



Universidade de Aveiro Departamento de Química
Ano 2010

**Cristina Isabel
Carvalho Araújo**

**Optimização do processo de lavagem de pasta
branqueada de eucalipto**



**Cristina Isabel
Carvalho Araújo**

**Optimização do processo de lavagem de pasta
branqueada de eucalipto**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química, realizada sob a orientação científica do Dr. Dmitry Victorovitch Evtugun, Professor Associado com Agregação do Departamento de Química da Universidade de Aveiro e do Engenheiro Vítor Lucas, gestor do departamento de produção de pasta da Celbi.

o júri

Presidente

Prof. Dr. Carlos Pascoal Neto

Professor Catedrático do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Dmitry V. Evtyugin

Professor Associado com Agregação do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

Eng. Vítor Lucas

Gestor do Departamento Produção de Pasta da Celbi, S.A

Eng. António Fernando dos Santos Prates

Responsável do Departamento Laboratório e Ambiente da Companhia de Celulose do Caima, S.A

Agradecimentos

Este é o espaço onde se pode dizer um “obrigado” a todos o que permitiram a minha chegada ate aqui.

Desde já um agradecimento a toda a minha família que é a base para a pessoa na qual me tornei hoje.

Agradecer também aos amigos, que são a família que se pode escolher, sempre presentes quando necessário dando sempre o apoio e força necessários.

Um obrigado a todos os ensinamentos e apoio prestados pelo orientador da universidade, o Professor Dimitry Evtugin.

Expresso à Celbi também o meu agradecimento pela oportunidade de realizar o estágio na sua unidade fabril,

No âmbito do meu trabalho desenvolvido em ambiente industrial, agradecer ao Eng. Vítor Lucas , assim como ao Eng. Henrique Costa todos os ensinamentos transmitidos e disponibilidade demonstrada para me ajudar nesta fase de transição em que me encontrava. O meu muito obrigada.

Dizer um obrigada também aos analistas do laboratório da Celbi que se mostraram disponíveis para me transmitirem os conhecimentos necessários para a realização do meu trabalho, assim como a todas as outras pessoas que fui conhecendo ao longo da minha estadia e que contribuíram para a minha integração, mostrando-se também disponíveis para ajudar.

Palavras-chave

Lavagem, branqueamento, pasta, kraft, CQO, factor de diluição, consistência, eficiência de Norden, *Eucalyptus globulus*.

Resumo

O principal objectivo deste trabalho de optimização no processo de lavagem de produção de pasta branqueada de *Eucalyptus globulus* passou por uma caracterização actual da situação da unidade fabril, tendo em conta o processo a partir do qual é feita essa produção, o processo kraft.

Numa fase posterior e tendo em conta o modelo de controlo instalado iniciou-se um estudo de controlo do factor de diluição assim como dos níveis de filtrado nos tanques. Tendo em conta a optimização do modelo, realizaram-se ajustes no set-point do FD, bem como nos factores correctivos das fórmulas que permitem o cálculo desses mesmos set-point; foram também realizados ensaios com caudal de lavagem ajustado.

As áreas em estudo neste trabalho são as linhas da lavagem e do branqueamento que, no total, são constituídas por oito prensas. De realçar a importância da boa eficiência de lavagem da primeira linha referida, uma vez que a pasta quando é encaminhada para o branqueamento ainda com elevadas quantidades de sujidade (elevado CQO) leva a um aumento das quantidades de produtos químicos necessários para atingir a brancura requerida pelo cliente. Uma etapa importante para o decréscimo no valor de CQO é a presença do duplo estágio na linha da lavagem, assim como do efeito do factor de diluição. Na linha do branqueamento, os agentes de branqueamento contribuem como um dos principais responsáveis para o cumprimento do objectivo final, ou seja, o atingir das características de pasta desejadas.

Com o factor de diluição mais elevado verificou-se que, apesar de se partir de uma pasta mais suja, se conseguiu obter um resultado final com as mesmas características, sendo mais benéfico operar com valores mais elevados no factor de diluição.

Ao analisar os parâmetros de caracterização das várias prensas verificou-se que existem duas prensas (Prensa 2 de cada uma das linhas) que são menos eficientes, apresentando valores mais baixos. Estes valores na prensa dois da lavagem podem dever-se a mau funcionamento na prensagem, devido a incrustações, o que na prática leva a que se façam paragens diárias, de modo a evitar a precipitação do composto que ainda se encontra por analisar. Quanto à prensa 2 no branqueamento existem problemas de colmatação o que também interfere no normal funcionamento deste equipamento, reflectindo-se na eficiência de lavagem.

Este mau funcionamento reflecte-se também na eficiência de Norden, outro factor de caracterização destes equipamentos de lavagem, diminuindo o valor desta, o que se reflecte no menor número de andares representados na prensa.

Keywords

Washing, bleaching, pulp, kraft, COD, dilution factor, consistencies, Norden Efficiency Factor, *Eucalyptus globulus*.

Abstract

The main objective of this work to optimize the washing process of the production of bleached pulp from *Eucalyptus globulus* went through a characterization of the current situation of the plant, taking into account the process from which this production is made, the kraft process.

At a later stage and in view of control model installed began a study of control of the dilution factor as the level of filtrate tanks. Given the optimal model, there were adjustments in the set-point of the FD, as well as corrective factors in the formulas for calculating these same set-point, tests were also conducted with flow was set.

The studied areas in this work are the lines of washing and bleaching, which in total, consist of eight presses. Highlight the importance of the first line that, once the folder when it is forwarded to the bleaching even with high amounts of soil (high COD) leads to an increase in the amount of chemicals needed to achieve the required whiteness by the client.

An important stage for the decrease in the amount of COD is the presence of double stage washing on the line, as well as the effect of the dilution factor. In line with the bleaching, the bleaching agents contribute as a major contributor to achieve the final aim, namely to achieve the characteristics desired folder.

With higher dilution factor was found that, despite being from a folder dirtier, if it could get a final result with the same features and is most beneficial to operate with higher values in the dilution factor.

By analysing the parameters characterizing the various presses found that there are two presses (screw 2 each line) that are less efficient, lower values. These figures in the press two washing may be due to a malfunction in the press, due to fouling, which in practice leads to the making daily stops in order to avoid precipitation of the compound is still in review. As for the press in the second bleaching clogging problems exist which also interferes with the normal operation of this equipment, reflected in the efficiency of washing.

This malfunction is also reflected in the efficiency of Norden, another factor characterizing this washing equipment, reducing the value of this, which is reflected in the smaller number of stories represented in the press.

ÍNDICE

Índice.....	vii
Nomenclatura	x
Índice de tabelas	xii
Índice de gráficos	xiv
Índice de figuras	xvi
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. Introdução	1
1.1.1. A Celbi	1
1.1.2. Objectivos do trabalho	1
1.2. Madeira	2
1.2.1. Importância deste recurso	2
1.2.2. Química da madeira	3
1.2.2.1. Estrutura da madeira	3
1.2.2.2. Composição química da madeira	6
1.2.2.2.1. Celulose.....	7
1.2.2.2.2. Hemiceluloses	8
1.2.2.2.3. Lenhina.....	9
1.3. Produção de pasta	12
1.3.1. Processos de produção de pasta	12
1.3.2. Processo kraft	12
1.4. Lavagem de pasta crua.....	18
1.4.1. Conceitos/definições.....	19
1.4.1.1. Difusão	19
1.4.2. Princípios de lavagem.....	21
1.4.2.1. Diluição / extracção	21
1.4.2.2. Deslocamento	22

1.4.2.3.	Desidratação compressiva.....	23
1.4.2.4.	Lavagem multi-estágios	24
1.4.2.5.	Lavagem fraccionada	25
1.4.3.	Equipamentos de lavagem	26
1.4.3.1.	Difusor de pressão	27
1.4.3.2.	Prensas de rolos	28
1.4.4.	Parâmetros de lavagem	30
1.4.4.1.	Factor de diluição	30
1.4.4.2.	Consistência da alimentação e descarga.....	32
1.4.4.3.	pH.....	32
1.4.4.4.	Temperatura.....	33
1.4.4.5.	Entrada de ar.....	33
1.4.5.	Eficiência de lavagem.....	34
1.4.5.1.	Razão de deslocamento, RD	34
1.4.5.2.	Razão de deslocamento equivalente, RDE	35
1.4.5.3.	Eficiência de remoção de CQO, ER	36
1.4.5.4.	Rendimento de lavagem, Y	36
1.4.5.5.	Factor de eficiência de Norden, E	37
1.4.5.6.	Factor de eficiência de Norden modificado, Emod.....	38
1.4.5.7.	Factor de eficiência de Norden, E10	38
2.	PARTE EXPERIMENTAL	40
2.1.	Fábrica da Celbi.....	40
2.1.1.	Breve descrição/ layout.....	40
2.2.	Ensaio realizados na unidade industrial.....	45
2.2.1.	Objectivos	45
2.2.2.	Caracterização laboratorial da pasta e filtrados em cada andar de lavagem	45

2.2.3.	estudo e caracterização da variação no set-point do factor de diluição (FD)	49
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
3.1.	Caracterização da linha de pasta	53
3.2.	Ensaio com variação no <i>set-point</i> do factor de diluição	63
4.	CONCLUSÕES	70
5.	BIBLIOGRAFIA	72
6.	ANEXOS	75

NOMENCLATURA

Abreviatura	Descrição	Unidades
BRANQ	Linha do branqueamento	—
C_D	Consistência à saída	%
C_{QO}	Carência química de oxigénio	$(Kg / tpsa)$ (mg / l)
cst_{in}	Consistência à entrada	%
cst_{out}	Consistência à saída	%
C_V	Consistência à entrada	%
D	Coefficiente de difusão	$(m^2.s^{-1})$
DCF	Factor de correcção de descarga	
FD	Factor de diluição	$(m^3_{licor} / tpas)$
ICF	Factor de correcção de entrada	
Galp	<i>B-D-galactopyranose</i>	—
GalpA	<i>B-D-galactopyranosyuronic acid</i>	—
GlupA	<i>4-O-methyl-α-D-glucopyranosyluronic acid</i>	—
J	Fluxo de difusão da espécie	$(Kg.m^{-2}.s^{-1})$
LCO	Lavagem , crivagem e oxigénio	—
L_1	Licor que entra com a pasta	$(m^3/tpsa)$
L_2	Licor que acompanha a pasta de saída	$(m^3/tpsa)$
R	<i>Acetyl group (CH₃CO)</i>	
RD	Razão de deslocamento	%
$tpas$	ton de pasta absolutamente seca	ton
$tpsa$	ton de pasta seca ao ar	ton

V_2	Quantidade de filtrado	$(m^3/tpsa)$
V_3	Quantidade de licor que entra na lavagem	$(m^3/tpsa)$
X_1	CQO na pasta de entrada	$(Kg\ O_2/ m^3_{licor})$
X_2	CQO na pasta de descarga	$(Kg\ O_2/ m^3_{licor})$
Xylp	<i>B-D-xylopyranose</i>	—
Y_2	CQO no filtrado	$(Kg\ O_2/ m^3_{licor})$
Y_3	CQO no licor de lavagem	$(Kg\ O_2/ m^3_{licor})$
$\frac{\partial c}{\partial x}$	Gradiente de concentração da espécie	$(Kg.m^{-4})$

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela A 1- Valores obtidos para a análise do difusor 1 tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.	75
Tabela A 2- Valores obtidos para a análise do difusor 2 tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.	76
Tabela A 3- Valores obtidos para a análise da prensa1 LCO tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.	78
Tabela A 4- Valores obtidos para a análise da prensa2 LCO tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.	79
Tabela A 5- Valores obtidos para a análise da prensa3A LCO tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.	80
Tabela A 6- Valores obtidos para a análise da prensa3B LCO tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.	80
Tabela A 7- Valores obtidos para a análise da prensa1 BRANQ tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.	81
Tabela A 8- Valores obtidos para a análise da prensa2 BRANQ tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.	81
Tabela A 9- Valores obtidos para a análise da prensa3A BRANQ tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.	82
Tabela A 10- Valores obtidos para a análise da prensa3B BRANQ tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.	82
Tabela A 11- Valores obtidos para a análise da prensa4A BRANQ tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.	82
Tabela A 12- Valores obtidos para a análise da prensa4B BRANQ tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.	83
Tabela A 13- Valores obtidos para a análise da prensa5 BRANQ tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.	83
Tabela A 14- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização deste equipamento de lavagem (difusor 1).	84

Tabela A 15- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização deste equipamento de lavagem (difusor 2).....	85
Tabela A 16- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização deste equipamento de lavagem (prensa1 LCO).	86
Tabela A 17- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização deste equipamento de lavagem (prensa2 LCO).	86
Tabela A 18- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização deste equipamento de lavagem (prensa3A LCO).	87
Tabela A 19- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização deste equipamento de lavagem (prensa3B LCO).	87
Tabela A 20- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização da prensa1 BRANQ.	88
Tabela A 21- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização da prensa2 BRANQ.	88
Tabela A 22- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização da prensa3A BRANQ.	88
Tabela A 23- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização da prensa3B BRANQ.	89
Tabela A 24- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização da prensa4A BRANQ.	89
Tabela A 25- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização da prensa4B BRANQ.	89
Tabela A 26- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização da prensa5 BRANQ.	90

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico1- Exportações e importações nacionais, do ano de 2005, relativas aos produtos florestais e derivados. ^[15]	3
Gráfico 2-Curva da deslenhificação e perfil de temperatura para o Eucalyptus globulus, em função do tempo de cozimento. ^[17]	14
Gráfico 3- Variação da eficiência de lavagem com a temperatura da pasta. ^[4]	33
Gráfico 4- Variação da eficiência de lavagem com o ar presente na pasta alimentada. ^[4]	34
Gráfico 5- Representação da evolução do CQO (mg/L) ao longo do Difusor 1, tendo em conta a colheita de amostras que foi realizada.	53
Gráfico 6- Evolução da consistência da pasta da alimentação e da descarga do difusor 1, assim com a consistência calculada a partir do balanço (à saída).	54
Gráfico 7- Representação da evolução do CQO (mg/L) ao longo do Difusor 2, tendo em conta a colheita de amostras que foi realizada.	54
Gráfico 8- Evolução da consistência da pasta da alimentação e da descarga do difusor 2, assim com a consistência calculada a partir do balanço (à saída).	55
Gráfico 9- Representação da evolução do CQO (mg/L) ao longo da 1ª prensa da lavagem, tendo em conta a colheita de amostras que foi realizada.	55
Gráfico 10- Evolução da consistência da pasta da alimentação e da descarga da prensa 1 da linha da lavagem.	56
Gráfico 11- Representação da evolução do CQO (mg/L) ao longo da prensa 2 da linha da lavagem, tendo em conta as amostras colhidas.	56
Gráfico 12- Evolução da consistência da pasta da alimentação e da descarga da prensa 2 da linha da lavagem.	57
Gráfico 13- Representação da evolução do CQO (mg/L) ao longo da prensa 3A da linha da lavagem, tendo em conta as amostras colhidas.	57
Gráfico 14- Evolução da consistência da pasta da alimentação e da descarga da prensa 3A da linha da lavagem	58

Gráfico 15- Representação da evolução do CQO (mg/L) ao longo da prensa 3B da linha da lavagem, tendo em conta as amostras colhidas.	58
Gráfico 16- Evolução da consistência da pasta da alimentação e da descarga da prensa 3B da linha da lavagem.	59
Gráfico 17- Evolução do CQO ao longo da linha de produção de pasta para factor de diluição de 1,5 m ³ /tpsa e comparação com os resultados obtidos aquando da produção com o valor do set-point do factor de diluição de 1,8 m ³ /tpsa	63
Gráfico 18- Evolução do CQO ao longo da linha de produção de pasta, e comparação de resultados de operação com diferentes factores de diluição.	64
Gráfico 19- Evolução do CQO ao longo da linha de produção de pasta, com destaque para ensaio realizado para a linha da lavagem (*).	66
Gráfico 20- Evolução das consistências, da entrada e da saída, ao longo da linha de produção de pasta, para dois valores diferentes de set-point no factor de diluição.	66
Gráfico 21- Evolução da eficiência de remoção ao longo da linha de produção de pasta, para dois valores diferentes de set-point no factor de diluição.	68
Gráfico 22- Evolução da E10 ao longo da linha de produção de pasta, para dois valores diferentes de set-point no factor de diluição.	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-Estrutura macroscópica da madeira. ^[14]	3
Figura 2-Estrutura microscópica e distribuição das fibras presentes da madeira. ^[14,10]	5
Figura 3- (a) representação da estrutura da parede celular e respectiva composição química (illustrated by Per Hoffmann). (b) modelo da parede celular com estrutura fibrilar da parede celular. ^[4]	6
Figura 4-Composição química da madeira.	6
Figura 5- Estrutura molecular da celulose. ^[4]	7
Figura 6- modelos teóricos da celulose I e II, respectivamente, onde estão representadas as ligações estabelecidas. ^[21]	8
Figura 7- Representação das xilanas nas folhosas (em cima) e das glucomananas, presentes nas resinosas (em baixo). ^[10]	9
Figura 8- Precursores da lenhina: (1) - álcool p-cumarílico, (2) - álcool coniferílico e (3) - álcool sinapílico . ^[4]	10
Figura 9- Segmento estrutural da lenhina onde estão representadas as principais ligações estabelecidas. ^[4]	11
Figura 10- Diagrama de blocos de uma fábrica de produção de pasta branqueada, a partir do processo kraft. ^[13]	13
Figura 11- Mecanismo do branqueamento com oxigénio. ^[7]	17
Figura 12- Passos de decomposição do peróxido de hidrogénio e posterior reacção com metais de transição. ^[7]	17
Figura 13- Esquema ilustrativo do processo de difusão que ocorre nas fibras da madeira. ^[4]	21
Figura 14-Esquema ilustrativo do princípio de lavagem descrito (diluição/extracção). ^[4]	21
Figura 15- Ilustração do princípio da lavagem por deslocamento. ^[4]	23
Figura 16- Princípio da desidratação compressiva. ^[4]	24

Figura 17- Representação esquemática do princípio de lavagem em contra-corrente num sistema de lavagem com n-estágios. ^[4]	25
Figura 18-Representação do princípio da lavagem fraccionada com dois andares e sem mistura intermédia.	26
Figura 19- Esquema do difusor de pressão Kvaerner. ^[4]	28
Figura 20- Representação esquemática da prensa de rolos, (a) The metso Twin roll press (b) The Kvanerner pulping Compact pressing. ^[4]	29
Figura 21- Representação esquemática das correntes (entrada e saída) de um equipamento de lavagem. ^[6]	31
Figura 22- Diagrama esquemático do layout da Celbi. ^[11]	40
Figura 23- Diagrama dos pontos de colheita da zona da lavagem. ^[11]	47
Figura 24- Diagrama dos pontos de colheita da zona do branqueamento. ^[11]	48
Figura 25- Diagrama esquemático dos circuitos alcalino e ácido da zona do branqueamento. ^[11]	52

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. INTRODUÇÃO

1.1.1. A CELBI

A Celbi é uma empresa de produção de pasta de fibra curta reconhecida no mercado pela sua capacidade de produção de pasta de papel de elevada qualidade, aliada a um excelente serviço junto do cliente. ^[11]

A empresa localiza-se na Leirosa junto da costa, o que trazia algumas vantagens para a instalação da unidade fabril. Entre as vantagens podem enumerar-se a proximidade com áreas florestais com disponibilidade de matéria-prima; abundância de água, indispensável para o processo produtivo; proximidade com o oceano Atlântico; proximidade com o porto comercial da Figueira da Foz e ainda disponibilidade de mão-de-obra qualificada. ^[11]

No início de Janeiro de 2007 começou a implementação do Projecto de Expansão da Celbi, que prevê a adaptação, em cada fase do ciclo produtivo, das melhores tecnologias disponíveis e ainda a construção de um ramal ferroviário interno que servirá o armazém de pasta. A empresa deverá aumentar assim a sua capacidade de produção de pasta de 300 mil para 550 mil toneladas. ^[11]

1.1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO

Este trabalho intitula-se “Optimização do processo de lavagem de pasta branqueada de eucalipto” e foi realizado em parceria com a Celbi no âmbito da conclusão do Mestrado integrado de Engenharia Química na Universidade de Aveiro.

Numa primeira fase foi feito um estudo para caracterização da situação actual do funcionamento de toda a linha de lavagem. Para isso foi feita uma caracterização de cada uma das prensas, através do cálculo de vários parâmetros de lavagem, entre eles, a eficiência de lavagem. Estas foram calculadas recorrendo a balanços de CQO (carência química de oxigénio) nas várias correntes, à entrada e saída, tendo em conta os pontos de recolha de amostra de licor e pasta.

Numa segunda fase, o objectivo foi a caracterização da linha do branqueamento, à semelhança do que se realizou para a linha da lavagem. O outro objectivo passou pela optimização do modelo de supervisão dos factores de diluição que a fábrica tem instalado para controlo dos caudais de lavagem e posterior análise da resposta dada pelo sistema.

1.2. MADEIRA

1.2.1. IMPORTÂNCIA DESTE RECURSO

Tendo em conta dados publicados pela Associação Empresarial de Portugal (AEP), o sector florestal nacional constitui uma riqueza estratégica a vários níveis, dos quais se destacam, o nível ambiental, social e económico. Por isso acolhe também por unanimidade necessidade de preservação e desenvolvimento. A nível económico contribui com cerca de 3% de valor acrescentado bruto e com 10% de exportações nacionais. ^[15]

Tendo em conta dados publicados do último Inventário Florestal Nacional (IFN), 2005/2006, da direcção geral dos recursos florestais, a floresta nacional ocupa 3.4 milhões de hectares, de onde se realçam 67 milhões de m³ de pinho e 41 milhões de m³ de eucalipto, estas as principais madeiras de pé que são utilizadas como matérias prima nas indústrias. ^[15]

A nível de mercado de produção de pasta e papel, Portugal encontra-se como um grande produtor, onde os grupos que mais se destacam são o grupo Altri e o grupo Portucel Soporcel. O grupo Altri com o projecto de expansão pretende atingir 900 mil ton/ ano de produção de pasta e papel, enquanto o grupo Portucel Soporcel pretende chegar a valores que rondam 1.55 milhões ton/ano. ^[12,16]

A pasta e o papel produzidos são na sua maioria exportados, representando 2% do PIB nacional e cerca de 10% das exportações nacionais (dados referentes a 2005). Nos últimos anos, verifica-se uma tendência de crescimento nas exportações, assim como nas importações, tendo as pastas branqueadas de resinosas acompanhado a tendência de crescimento, apesar de na etapa de branqueamento destas ainda haver alguma instabilidade. ^[15]

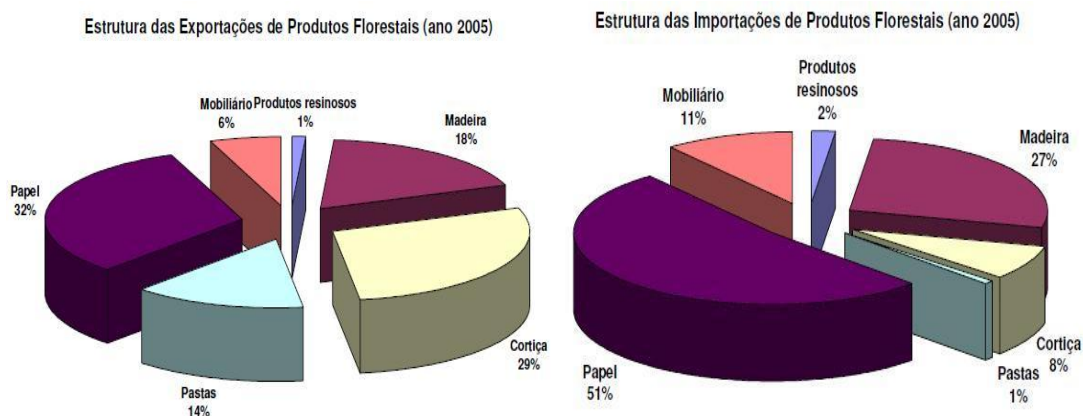


Gráfico1- Exportações e importações nacionais, do ano de 2005, relativas aos produtos florestais e derivados. ^[15]

1.2.2. QUÍMICA DA MADEIRA

1.2.2.1. ESTRUTURA DA MADEIRA

Dado que a madeira é a principal matéria-prima de uma fábrica para produção de pasta para papel é relevante ter uma caracterização da estrutura desta. O conhecimento da estrutura da madeira é relevante, ajudando a explicar e a controlar as várias reacções que se passam ao longo do processo. ^[10]

Fazendo uma caracterização da estrutura de fora para dentro todas as espécies são constituídas por uma raiz um tronco e uma copa. Para a indústria papeleira, a que tem maior valor comercial é o tronco da árvore, que tem uma estrutura macroscópica como se apresenta na *Figura 1*. ^[10]

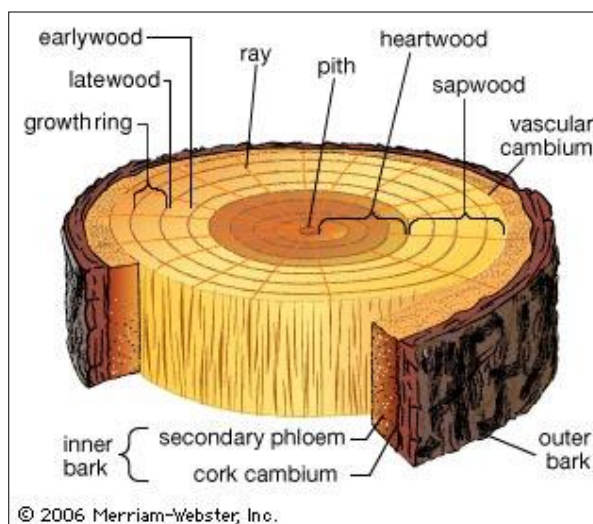


Figura 1-Estrutura macroscópica da madeira. ^[14]

A casca externa da árvore ou xilema tem função de protecção da árvore. Esta parte da casca é constituída por células que existiram na casca mais interna. A casca interna ou floema tem a função de transporte, ao longo da árvore, de sais minerais e água. ^[10]

O câmbio é a zona onde ocorre divisão celular e a partir da qual se dá o crescimento da árvore. O aumento de diâmetro que ocorre deve-se sobretudo ao crescimento de xilema, relativamente ao de floema. Dadas as velocidades relativas a que este processo ocorre nas alturas da Primavera e do Outono, a partir da contagem dos anéis da espécie, é possível saber a idade da mesma. ^[10]

O borne é a zona envolvente do cerne e tem como função de suporte para a parte da coroa e ainda transporte da seiva até as raízes e as folhas. ^[10]

O cerne localiza-se na zona mais interna do tronco e é constituído por células que já não tem actividade fisiológica, constituindo o lenho não funcional, tendo função de suporte para a árvore. ^[10]

Tendo em conta a composição celular da madeira existem dois grandes grupos, as gimnospérmicas ou resinosas (softwood) e as angioespérmicas ou folhosas (hardwood). Para produção de pasta para papel são as folhosas as mais utilizadas, entre elas, *Betula pendula* (nos países nórdicos) enquanto na península ibérica e América do sul domina a espécie *Eucalyptus* (*E. globulus*, *E. grandis*, *E.urograndis*). ^[10,17]

A nível microscópico, como se pode ver na *Figura 2*, as resinosas são constituídas apenas por dois tipos de células diferentes, o parênquima, que tem função de suporte, e os traqueídos ou fibras, que tem semelhante função aos vasos, dado que neste tipo de madeira estes estão ausentes. Nas folhosas existem ainda células designadas de vasos, que têm função de transporte da água e dos nutrientes. De realçar também o tamanho diferente dos traqueídos das resinosas (fibra longa) e das folhosas (fibra curta). ^[10]

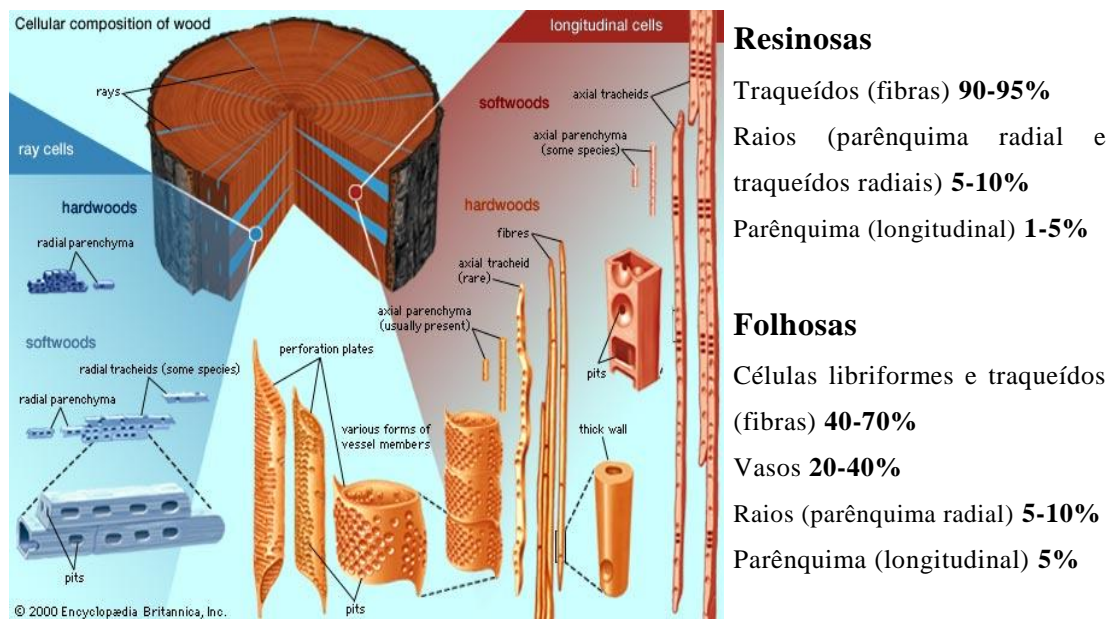


Figura 2-Estrutura microscópica e distribuição das fibras presentes da madeira. ^[14,10]

Para uma caracterização ainda mais pormenorizada já foram realizados estudos ao nível dos tecidos mais internos da madeira, em particular, para o conhecimento da constituição da parede celular. A parede celular na sua constituição tem três camadas principais como se pode verificar na *Figura 3*: a parede primária (P), a parede secundária que se encontra dividida em 3 subcamadas (S_1 , S_2 , S_3) e a parede terciária ou camada rugosa (w). As diferentes camadas têm diferentes composições químicas. Na parede primária a lenhina é o componente dominante. Na subcamada S_1 há um equilíbrio entre a celulose, hemicelulose, e lenhina (36%:36%:28%, respectivamente), enquanto nas subcamadas S_2 e S_3 há uma percentagem mais elevada de lenhina. A lamela média (ML) é localizada entre as células e tem como função manter as células agregadas. É composta essencialmente por lenhina, no entanto, como esta camada é fina apenas 20-25% da lenhina total da madeira está localizada nesta camada. ^[10]

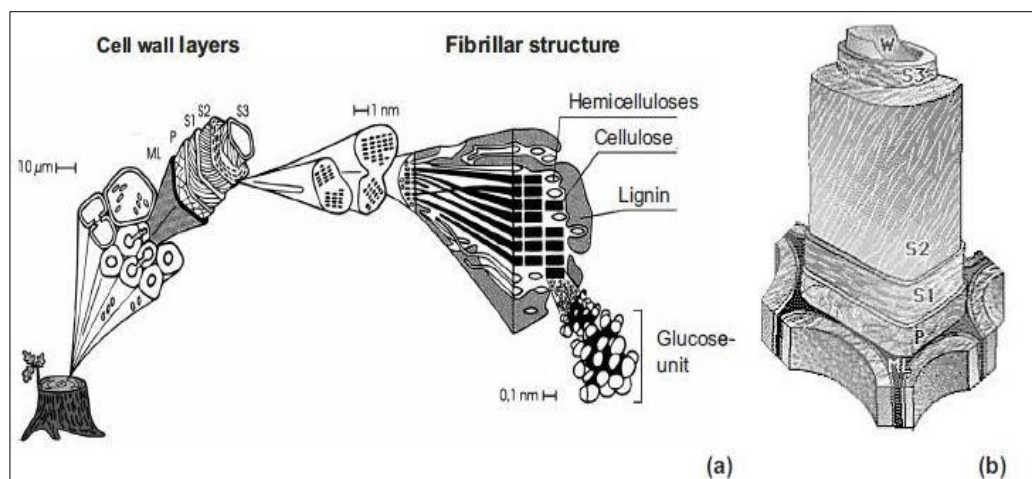


Figura 3- (a) representação da estrutura da parede celular e respectiva composição química (illustrated by Per Hoffmann). (b) modelo da parede celular com estrutura fibrilar da parede celular. ^[4]

1.2.2.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA

A madeira é um recurso constituído essencialmente por componentes macromoleculares (96-89%), onde estão incluídos a lenhina e os polissacarídeos, de onde se destacam a celulose e as hemiceluloses. Existem ainda os compostos de baixo peso molecular (2-3%), onde se inserem as cinzas e os extractáveis. Consoante a madeira em causa, as proporções dos principais constituintes variam, apesar da constituição base não sofrer alteração. (Figura 4) O caso apresentado em seguida, é particularizado para o *Eucalyptus globulus*.

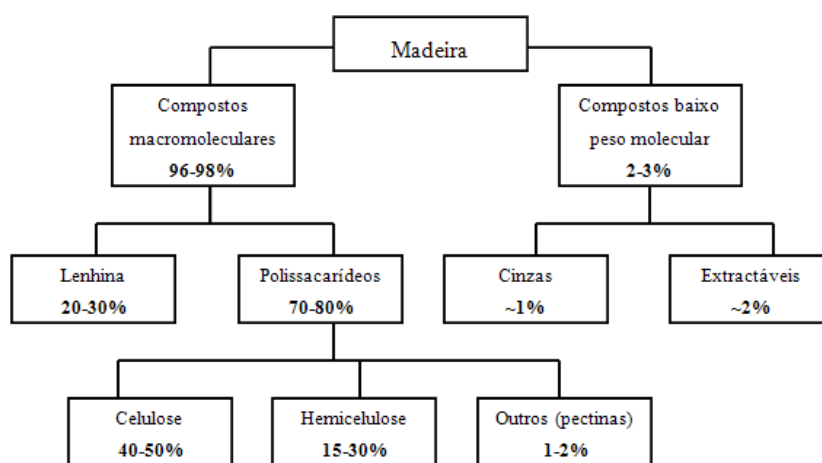


Figura 4-Composição química da madeira.

1.2.2.2.1. CELULOSE

A celulose é o recurso renovável mais abundante que se encontra disponível na Terra. É um homopolissacarídeo constituído por unidades de β -D-glucopirranose, que se ligam a partir de ligações glicosídicas $\beta(1 \rightarrow 4)$, onde a unidade base é a celobiose (*Figura 5*). As moléculas de celulose são lineares e tem tendência para formar ligações por pontes de hidrogénio intra e intermoleculares, o que confere á celulose grande estabilidade e resistência. O seu grau de polimerização pode variar entre 3000 e 15000. ^[4,10]

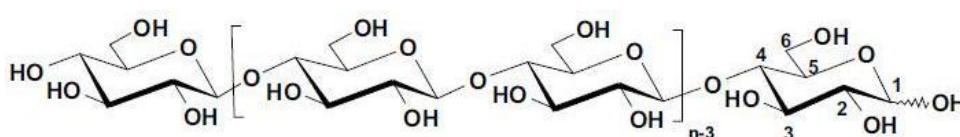


Figura 5- Estrutura molecular da celulose. ^[4]

As diferentes ligações por pontes de hidrogénio intermoleculares na celulose resultam numa complexa organização, o que explica a maioria das propriedades que lhe são atribuídas. A celulose possui zonas cristalinas e amorfas, resultando estas últimas de uma menor organização em termos estruturais. As zonas cristalinas e amorfas agrupam-se, resultando daí uma fibrila (fibrila elementar). A junção de várias fibrilas origina uma macrofibrila, de onde resulta a fibra celulósica, por junção de várias macrofibrilas, rodeadas de hemiceluloses. ^[4,10,21]

Tendo em conta as zonas amorfas e cristalinas que caracterizam a celulose, esta tem propriedades características associadas. De realçar a capacidade hidrofílica associada às zonas amorfas enquanto nas zonas cristalinas há intumescência inter e intrafibrilar. Para além de ocorrer com água, a intumescência, pode também ocorrer com soluções alcalinas. Com isso a celulose aumenta de volume ficando “retidas” moléculas de água no interior da fibra, permitindo um processo de osmose. ^[10]

Dada a estrutura cristalina da celulose, definiu-se o grau de cristalinidade que expressa o quociente mássico entre a fase cristalina em relação ao total. Para a celulose regenerada o grau de cristalinidade varia entre 65-75%, enquanto para a celulose nativa é de 50-65%.

A partir de estudos de difracção de raio-X foi possível uma caracterização da estrutura cristalina de diferentes tipos de celulose. A celulose I, celulose nativa, origina a celulose II, celulose regenerada, a partir de uma reacção em meio alcalino (swelling). A celulose II é mais estável, dadas as pontes de hidrogénio que estabelece, tanto ao longo da cadeia, como em planos adjacentes, enquanto na celulose I as cadeias estabelecem ligação, em planos adjacentes, a partir de ligações de Van der Waals (*Figura 6*). As celulosas III e IV resultam da celulose I e II, respectivamente, a partir de tratamento químico e aquecimento. ^[10,21]

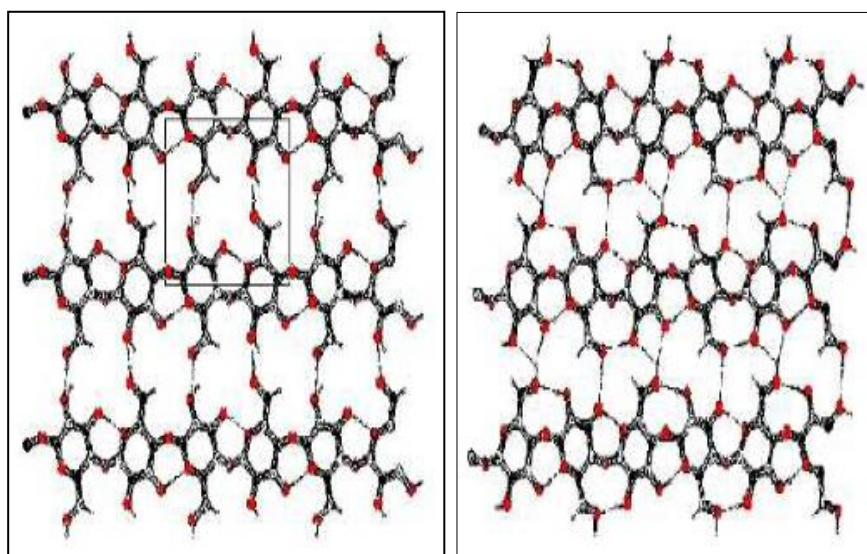


Figura 6- modelos teóricos da celulose I e II, respectivamente, onde estão representadas as ligações estabelecidas. ^[21]

1.2.2.2.2. HEMICELULOSES

As hemiceluloses são um heteropolissacarídeo da madeira e diferem da celulose na composição, dada a presença de vários açúcares e assimetria provocada na cadeia (não linear), devido às unidades constituintes. São mais brancas e tem um peso molecular mais baixo, com grau de polimerização que varia entre 50-200. ^[4]

Estas já não têm a capacidade de formar estruturas com elevadas estabilidade. Aliás são caracterizadas por estruturas amorfas, devido ao empacotamento irregular que as caracteriza. ^[10]

Entre os polissacarídeos mais importantes que constituem as hemiceluloses estão as glucomananas, mais abundantes nas resinosas (8-14%), e as xilanas, presentes em maior quantidade nas folhosas (15-25%).^[4] (Figura 7)

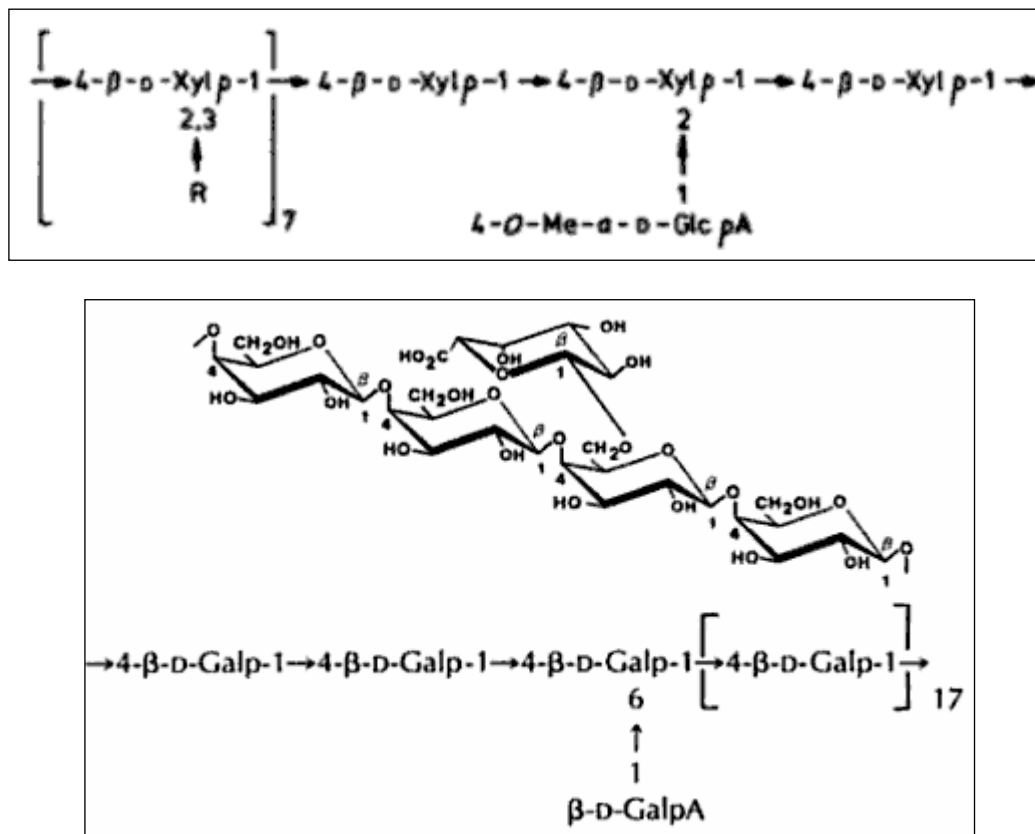


Figura 7- Representação das xilanas nas folhosas (em cima) e das glucomananas, presentes nas resinosas (em baixo).^[10]

1.2.2.2.3. LENHINA

O outro componente principal da madeira é a lenhina que tem uma estrutura macromolecular reticulada, constituída maioritariamente por unidades derivadas do fenilpropano. O seu grau de polimerização é o menor entre os três constituintes maioritários da madeira. A presença da lenhina na estrutura fibrosa torna-a coesa, estando aí uma razão para a deslenhificação ser um processo complexo.^[4,10]

A lenhina forma-se a partir de reacções de acoplamento, entre radicais provenientes dos álcoois precursores: p-cumarílico (unidades de p-hidroxifenilpropano), coniferílico (unidades de guaiacilpropano) e o sinapílico

(unidades de siringilpropano), sintetizados a partir do álcool cinâmico. (*Figura 8*)^[4,10]

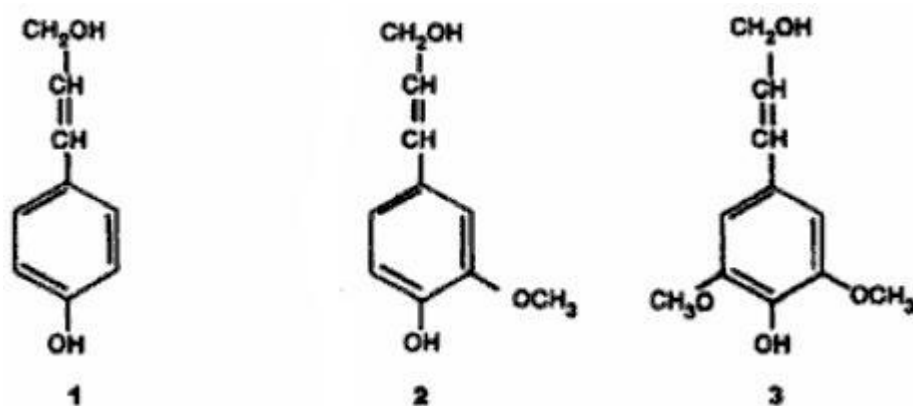


Figura 8- Precursores da lenhina: (1) - álcool p-cumarílico, (2) - álcool coniferílico e (3) - álcool sinapílico .^[4]

A distribuição das unidades H, G e S é desigual nas resinosas e nas folhosas. Nas resinosas, as unidades G, unidades de guaiacilpropano, têm uma abundância muito superior em relação às duas restantes unidades, sendo que a unidade G é menos reactiva que a unidade S. Nas folhosas há uma maior variabilidade na composição da lenhina. As unidades dominantes são a G e S, unidades de guaiacilpropano e siringilpropano, respectivamente.^[4,10]

Durante a etapa de cozimento, aquando da produção de pasta para papel, um dos objectivos passa pela remoção da lenhina para que na etapa de branqueamento, a quantidade de produtos químicos necessários seja menor. Para tal é necessário quebrar as ligações que se estabelecem, representadas na *Figura 9*, sendo a mais abundante a $\beta-O-4$.

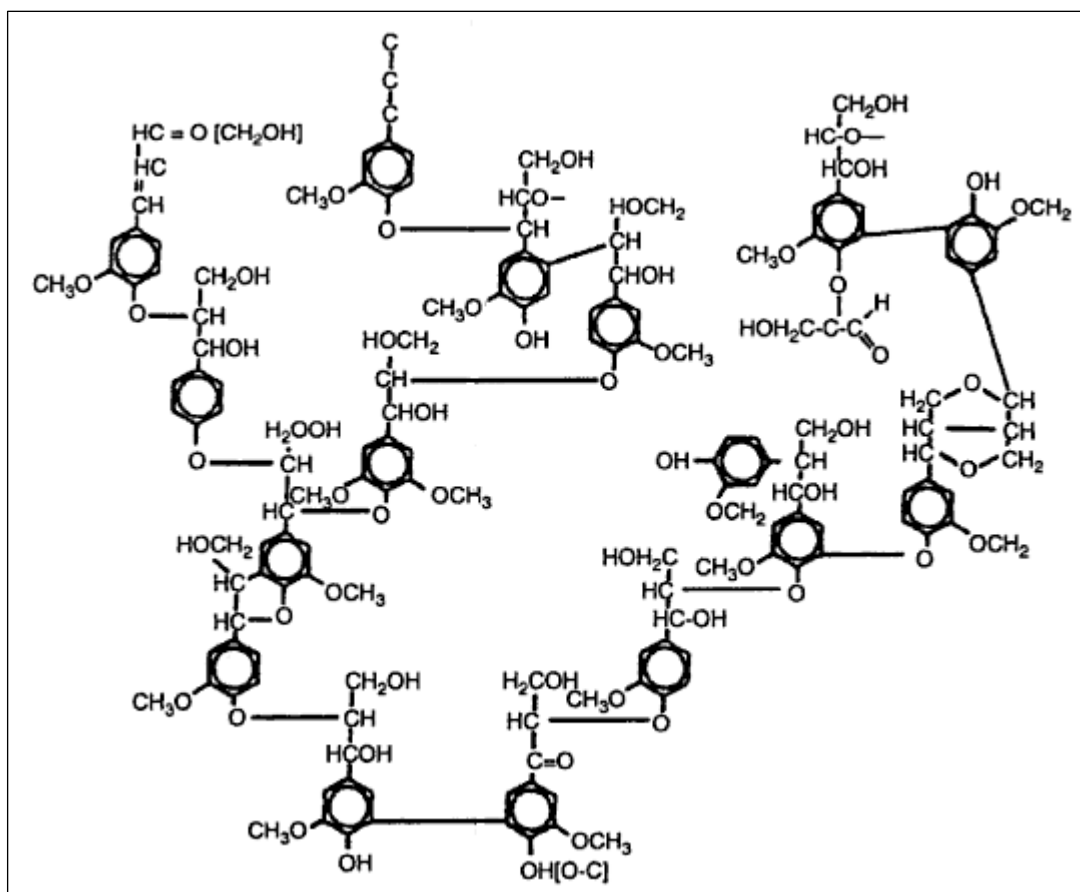


Figura 9- Segmento estrutural da lenhina onde estão representadas as principais ligações estabelecidas. ^[4]

1.3. PRODUÇÃO DE PASTA

1.3.1. PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE PASTA

A produção de pasta de papel pode ser feita utilizando processos químicos, semi-químicos, mecânico e químico-mecânico. Ao produzir pasta a partir de um processo químico pretende-se a remoção parcial da lenhina, sem que as fibras sejam destruídas, resultando pasta celulósica. O processo de deslenhificação é efectuado no digestor, onde se dá o cozimento da pasta, resultando a pasta crua. Num processo químico, o rendimento base madeira está entre 35-60%. As pastas resultantes caracterizam-se por um teor de lenhina muito baixo, sendo utilizadas para produção de papel de elevada qualidade.

Dependendo dos agentes utilizados no processo, este pode ser alcalino, entre eles o processo Kraft e o processo à Soda, ou ácido, como por exemplo o Sulfito ácido e o bissulfito. Actualmente, o processo mais utilizado é o processo químico, em particular, o processo kraft. Este apresenta a capacidade de produzir um papel com maior resistência física e mecânica, tem menor tempo de cozimento quando comparado com outros processos químicos, é passível de ser aplicado a vários tipos de madeira e oferece a capacidade de recuperação de todos os produtos químicos utilizados, tornando o processo mais competitivo e mais viável a nível económico.

1.3.2. PROCESSO KRAFT

No processo estão envolvidas várias etapas sequenciadas, estando as mais importantes representadas de modo esquemático, como se pode ver no diagrama apresentado em seguida.

No processo kraft a madeira entra para o digestor, sobre a forma de aparas, para ser cozida, com auxílio de temperaturas elevadas e de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfureto de sódio (Na₂S). A pasta produzida tem elevada resistência e o papel produzido a partir desta tem aplicação em áreas de impressão e decoração, assim como papéis de elevada resistência.

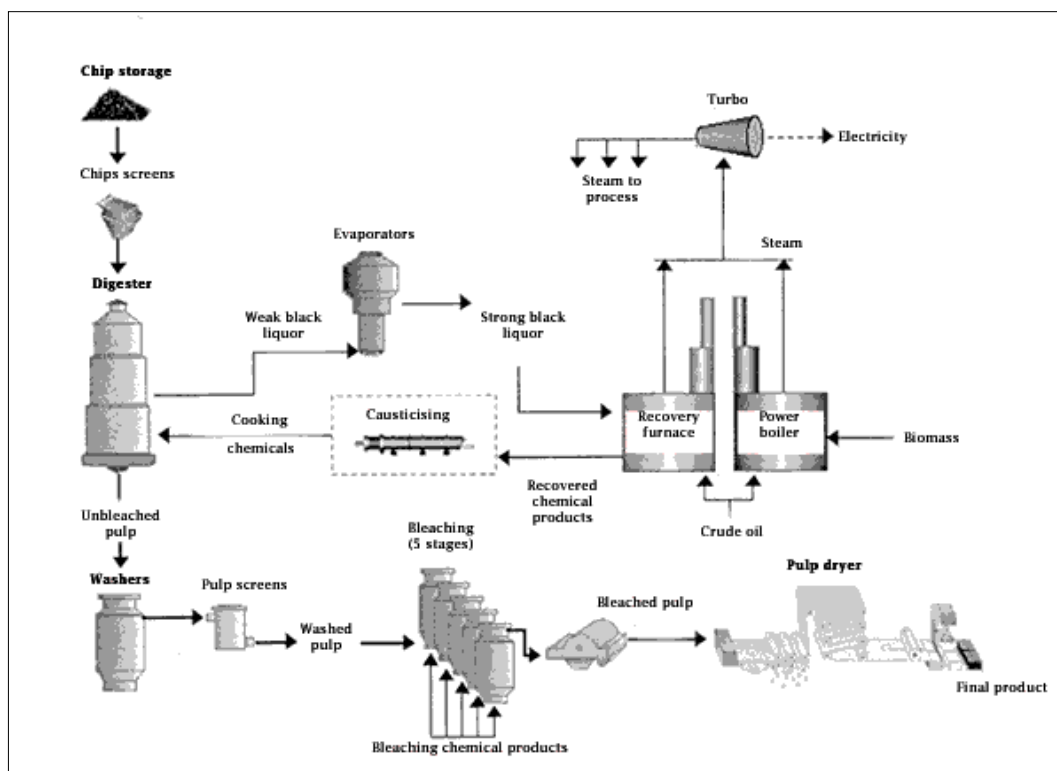


Figura 10- Diagrama de blocos de uma fábrica de produção de pasta branqueada, a partir do processo kraft. ^[13]

A preparação da madeira, matéria prima principal da unidade fabril, é o primeiro passo. Para tal os rolos passam por vários passos, entre eles, descascador, destroçador, tremonha de aparas e impregnador, até que as aparas são alimentadas ao digestor, onde se dá o cozimento da mesma. Este cozimento dá-se a partir da reacção com o licor de cozimento, o licor branco, que é constituído essencialmente por 2 componentes, o sulfureto de sódio (Na_2S) e o hidróxido de sódio (NaOH), sendo este o principal responsável pelo carácter alcalino do processo, já que fornece os iões OH^- , que ajudam na quebra das ligações $\beta-O-4$ e $\alpha-O-4$ presentes na lenhina. Por outro lado, o ião HS^- protege a lenhina contra a condensação que assim pode participar na deslenhificação de unidades fenólicas com a clivagem de ligações $\beta-O-4$.

O processo de cozimento das aparas envolve reacções heterogéneas que são influenciadas pela maneira como o transporte das espécies activas do licor de cozimento, OH^- e HS^- , é feito até ao interior das aparas, assim como pela difusão (difusão radial) no interior das mesmas. É também de considerar a reacção

química que ocorre, bem como a difusão dos produtos de reacção para o exterior da apara (por difusão axial). Os produtos são ainda transportados para o seio do licor. De entre estes passos o passo que controla é o passo de difusão do licor de cozimento para o interior das aparas, dado que é o passo mais lento. A reacção química é bastante rápida.

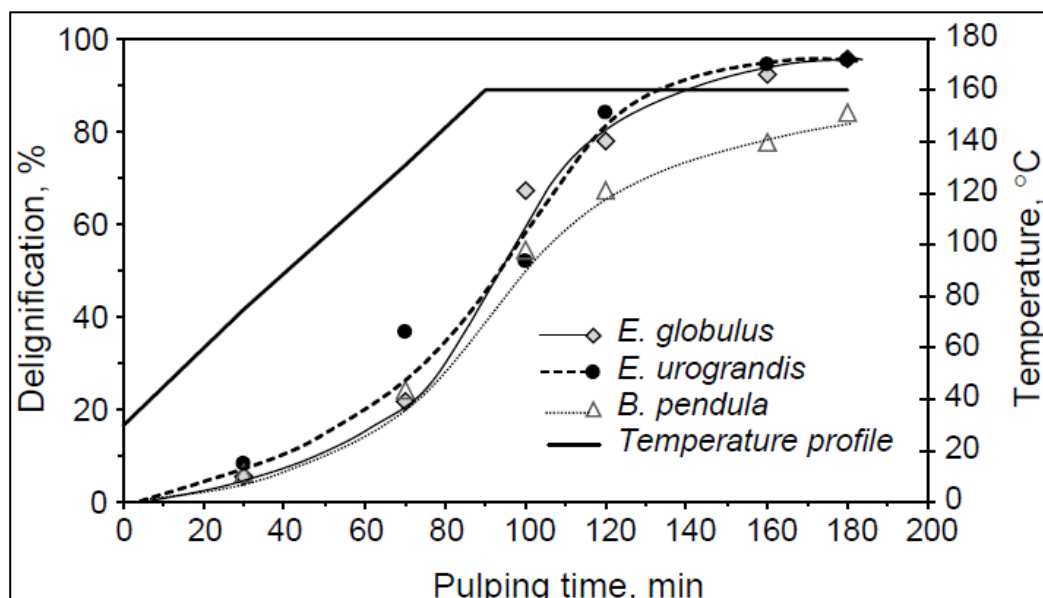


Gráfico 2-Curva da deslenhificação e perfil de temperatura para o *Eucalyptus globulus*, em função do tempo de cozimento. ^[17]

Ao longo do gráfico é perceptível a presença de três fases: a fase inicial, a principal e a residual. ^[18]

A fase inicial é controlada pela difusão de reagentes, havendo uma remoção da lenhina à volta dos 20-30% e é nesta fase que a maior parte dos polissacarídeos são removidos. Na fase principal, quando os reagentes já chegaram a todas as partes das aparas, a deslenhificação é controlada pela reacção química. É nesta fase que há maior teor de lenhina removida, andando por volta dos 90%. Na fase residual, a remoção de lenhina não passa dos 95%, e é feita com uma velocidade de remoção menor que na fase anterior. ^[18]

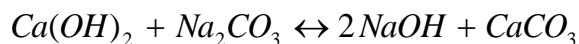
À saída do digestor é obtida pasta crua e licor negro. A pasta segue para a zona da lavagem e crivagem. Nesta zona é feita a remoção dos nós e incozidos, com auxílio de crivos por onde passa a pasta, para além da remoção da lenhina que ainda

exista em solução. O licor resultante, licor negro, vai para a linha de recuperação para que o ciclo kraft fique fechado.

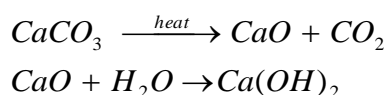
O licor negro é um subproduto resultante do cozimento da pasta para papel. Este licor é a combinação de vários resíduos desta etapa, estando presente lenhina solubilizada, hemiceluloses, produtos químicos utilizados na reacção e água. Este licor representa uma fonte de energia significativa numa fábrica de pasta, uma vez depois é evaporado e concentrado, sendo transformado em energia, recuperando também a parte inorgânica, ou seja, o “smelt”, constituído por carbonato de sódio (Na_2CO_3) e sulfato de sódio (Na_2S), que origina depois o licor verde. ^[6]

O licor verde segue para a caustificação para que se converta o Na_2CO_3 em NaOH e para que sejam removidas várias impurezas, introduzidas no forno e no forno de cal. Após a caustificação, resulta o licor branco, que é constituído, essencialmente por, Na_2S e NaOH , os dois reagentes principais do processo kraft. ^[6]

A reacção característica do ciclo de caustificação é apresentada em seguida.



Em circuito fechado, ocorre ainda a queima do carbonato de cálcio, para produção de óxido de cálcio, com objectivo de recuperar o hidróxido de cálcio, consumido na reacção de caustificação.



Na saída da zona da lavagem é obtida pasta lavada que depois seque para a zona do branqueamento onde o objectivo principal é elevar a brancura para obter pasta, para posterior produção de papel branco. Esta brancura é obtida com introdução de reagentes no processo, entre eles, H_2O_2 e ClO_2 . É o consumo de reagentes nesta fase do processo de produção, um dos pontos responsáveis pelos custos associados a produção de pasta.

O branqueamento é uma etapa da produção de pasta para papel que, no seu início, ainda integra uma pequena fase de deslenhificação. Este processo ocorre antes de uma fase de oxidação de grupos cromóforos, grupos estes que são

responsáveis pela cor castanha que a pasta apresenta até sofrer reacção com os químicos desta linha. Na fase de oxidação, a pasta é branqueada até à brancura pretendida. A brancura da pasta pode ser definida como a medida da reflectância da luz quando se faz incidir sobre a pasta um feixe de luz azul monocromático, com um comprimento de onda de 457 nm, comparando com a reflectância de um padrão primário, geralmente, o óxido de magnésio. Os valores de brancura são normalmente expressos em %, tendo em conta o padrão utilizado. [5]

Os objectivos do branqueamento passam, numa fase inicial, pela remoção da lenhina que ainda permanece na pasta após o cozimento para que na fase posterior seja atingida a brancura pretendida, sem que a celulose seja danificada. Para tal são utilizados agentes do branqueamento selectivos, agentes que fazem a remoção da lenhina sem destruir as cadeias de celulose, a partir da redução dos grupos cromóforos. [1,4,7]

Nesta fase, é influente a forma como decorre o cozimento, uma vez que uma melhor deslenhificação implica um consumo menor de químicos, necessários para a etapa de branqueamento. O processo de branqueamento é afectado por vários parâmetros, entre os quais, a temperatura, a consistência da suspensão, o pH, o tempo de reacção e a carga de químicos que é aplicada. [1,6,7]

A etapa de branqueamento é mais eficaz quando são combinados vários estágios, estando em cada estágio reactores onde há uma combinação entre os reagentes utilizados nesta linha. Entre os reagentes químicos mais utilizados na linha do branqueamento de pastas químicas estão o dióxido de cloro, o peróxido de hidrogénio, o ozono e o hidróxido de sódio para a etapa de extracção. [1,7]

Assim a sequência utilizada é uma sequência ECF (Elemental Chlorine Free), uma vez que só é utilizado o dióxido de cloro que não é um reagente com consequências tão nocivas, uma vez que o processo é livre de cloro (Cl_2).

As reacções de oxidação que ocorrem com os reagentes que são utilizados para fazer o branqueamento da pasta estão representadas em seguida. O oxigénio, decompõe-se em meio alcalino, a partir de uma reacção que segue um mecanismo radicalar que decorre em três passos, iniciação, propagação e terminação (*Figura 11*). O oxigénio é um agente de deslenhificação, assim como um agente branqueador, sendo utilizado principalmente na primeira função referida. [1,7]

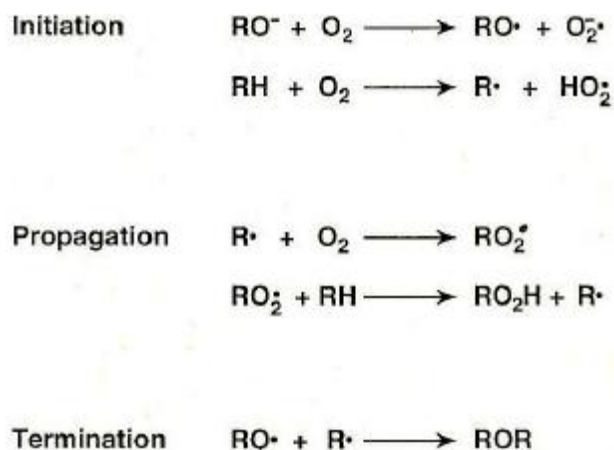


Figura 11- Mecanismo do branqueamento com oxigénio. ^[7]

O dióxido de cloro é o agente branqueador utilizado, uma vez que a sua utilização não está limitada a um estágio. A pasta é tratada com dióxido de cloro e depois sofre uma extracção alcalina, com o objectivo de ajudar a cumprir os objectivos estabelecidos para o branqueamento, assim como os objectivos ambientais. ^[7]

Já o peróxido de hidrogénio, decompõe-se em iões hidroxilo e aniões superóxido, na ausência e presença de metais de transição (*Figura 11*). Também quando é utilizado este reagente, as condições de pH são alcalinas. Este reagente é utilizado principalmente como agente branqueador, no entanto, pode ser introduzido na sequência para promover a deslenhificação. ^[7]

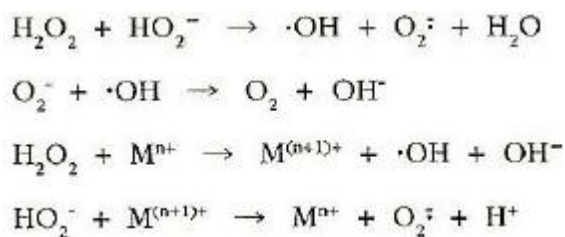


Figura 12- Passos de decomposição do peróxido de hidrogénio e posterior reacção com metais de transição. ^[7]

1.4. LAVAGEM DE PASTA CRUA

Na zona da lavagem há que considerar a presença do difusor de pressão, assim como da prensa de rolos.

O processo de lavagem aplicado na pasta, após o cozimento, tem como objectivos a remoção da lenhina presente na pasta e a recuperação dos químicos que se utilizam no processo, sendo também uma preocupação minimizar o consumo de água. Quanto maior a eficiência da lavagem da pasta, menor é a carga de químicos utilizados na zona do branqueamento, não elevando significativamente os custos.

As fibras da pasta embebidas em licor, vulgarmente chamadas de “manta de pasta”, são lavadas com licor de lavagem. Para que se forme a manta de pasta é necessário um meio filtrante, para reter a fibra, permitindo a extracção do filtrado da manta de pasta.

O processo que envolve a suspensão da pasta envolve três partes: uma fase líquida em torno da fibra, seguida de uma fase líquida imobilizada entre as fibras e o seu interior e a “fase” do sólido da fibra.

É importante então referir que o líquido livre que se encontra junto com as substâncias dissolvidas pode ser deslocado por outro líquido ou pode ser forçado pela rede da fibra. Por sua vez, o líquido que se encontra imobilizado, no interior ou entre as fibras, está menos acessível sendo também a sua remoção menos acessível. Por outro lado, a transferência de massa entre o líquido imobilizado e o líquido livre é controlada pela difusão.

No caso dos sólidos da fibra, uma parte das substâncias dissolvidas pode-se ligar por sorção as fibras, sendo dificilmente removida desde que se estabelece essa ligação.

A meio da linha de lavagem há uma etapa de deslenhificação com oxigénio, constituída por dois reactores de oxigénio que trabalham em série, em condições alcalinas e a temperaturas elevadas, com o objectivo de reduzir o teor de lenhina residual.

Esta etapa é vantajosa uma vez que é uma extensão do processo iniciado no cozimento, já que nessa fase o objectivo também é remover a lenhina ainda

existente. As condições de remoção são mais brandas que as aplicadas no cozimento e a taxa de deslenhificação conseguida tipicamente, ronda os 35%.

Na linha de lavagem as operações realizadas são controladas tendo em conta alguns princípios, sendo os mais importante realçados em seguida. Os equipamentos de lavagem que são utilizados numa unidade fabril têm que operar com princípios como diluição/extracção, a difusão e o deslocamento. [4]

1.4.1. CONCEITOS/DEFINIÇÕES

1.4.1.1. DIFUSÃO

A difusão pode ser definida como o transporte líquido aleatório das moléculas, provocado pelo seu movimento, na tentativa de igualar as diferenças de concentração (*Figura 13*).

Na zona de lavagem, em todas as operações, a difusão controla a troca de espécies dissolvidas entre o licor de lavagem (aquele que flui livremente fora das fibras e que tem baixa concentração em sólidos dissolvidos) e o licor que está junto com as fibras (licor imobilizado entre e junto das fibras e com elevada concentração de sólidos).

Este princípio é descrito, relativamente à transferência de massa, por uma equação básica, a lei de Fick. Esta expressa que o fluxo de difusão de uma substancia é proporcional ao seu gradiente, como se pode ver na expressão seguinte.

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

À escala macroscópica, $\frac{\partial c}{\partial x}$ representa o gradiente de concentração da espécie que difunde através da parede da fibra. Quanto mais elevada é a diferença de concentração, entre o interior e o exterior da fibra, maior é o fluxo de difusão que se gera.

O coeficiente de difusão depende do tipo de madeira que é utilizada para produzir a pasta, da lenhina e do seu conteúdo que se encontra na parede da fibra,

do pH e da força iónica do licor, e da temperatura, para além da substância que difunde.

A difusão acontece até que a concentração iguale a concentração de saída. Tendo em conta a segunda lei de Fick, representada na equação seguinte, a variação da concentração em função do tempo para uma certa posição é também dependente do coeficiente de difusão.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2)$$

Assim, a dependência expressa na segunda lei de Fick é também influenciada pelos mesmos factores do fluxo de difusão. O tamanho das espécies que estão a difundir é relevante, uma vez que, os iões mais pequenos difundem rapidamente, o que faz com que a concentração de equilíbrio, dentro e fora das fibras, seja alcançada em pouco tempo. Quando se trata das moléculas de lenhina dissolvidas, o tempo necessário para atingir a concentração de equilíbrio é muito superior, dado o tamanho das moléculas.

Na prática estas questões têm de ser levadas em consideração no design dos equipamentos. É preciso assegurar que as substâncias que se encontram dissolvidas passam através das fibras para o licor que as rodeia. A difusão pode fazer com que a capacidade necessária na zona de lavagem seja maior, principalmente em casos de difusão de grandes moléculas ou altos níveis de concentrações iniciais dentro das fibras, como por exemplo, após o cozimento ou após a deslenhificação com oxigénio. O esquema seguinte é ilustrativo do processo de difusão que ocorre nas fibras de madeira. ^[4]

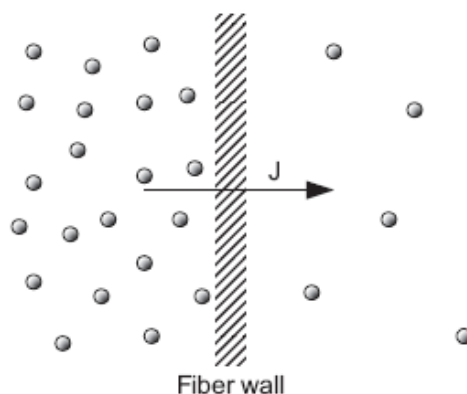


Figura 13- Esquema ilustrativo do processo de difusão que ocorre nas fibras da madeira.^[4]

1.4.2. PRINCÍPIOS DE LAVAGEM

1.4.2.1. DILUIÇÃO / EXTRACÇÃO

A repetição consecutiva das operações de diluição e extracção ainda hoje constitui o método mais simples de lavagem da pasta. Como ilustrado na figura seguinte, a pasta alimentada para a zona da lavagem é diluída e cuidadosamente misturada com o licor de lavagem (1) para depois ser espessada por filtração. Esta filtração normalmente é auxiliada por uma diferencial de pressão aplicada sobre a manta de pasta ou então por prensagem. Após a mistura a pasta é descarregada e o filtrado extraído (2).

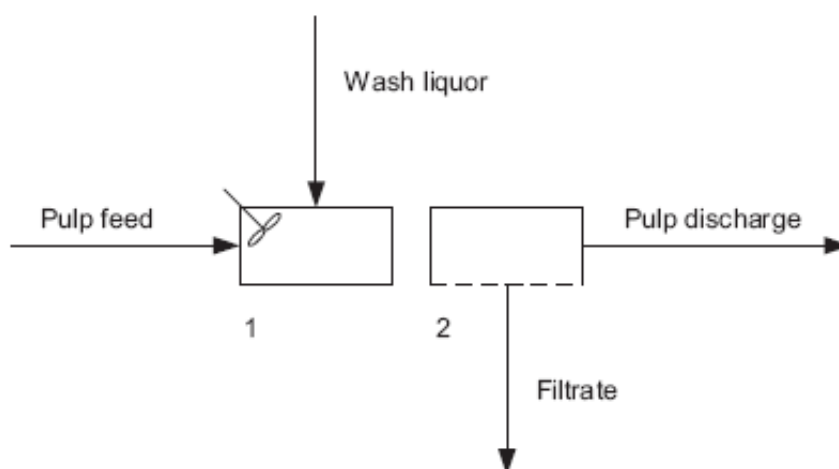


Figura 14-Esquema ilustrativo do princípio de lavagem descrito (diluição/extracção).^[4]

Para que todos os solutos sejam removidos com a utilização deste método, é necessário que este seja repetido várias vezes e que seja utilizada água limpa ao fazer a lavagem. Isto não se torna viável uma vez que elevaria os consumos de água da fábrica para valores insuportáveis tanto a nível económico como a nível ambiental.

Assim, a eficiência deste método não é muito elevada e esta depende da consistência para a qual a pasta é diluída e prensada. É influenciada também pela extensão com que o soluto é sorvido nas fibras e pelo tempo que é necessário para que o soluto se difunda para fora das fibras. ^[3]

Nas fábricas de pasta de papel construídas em tempos mais recentes, já não há uma zona específica onde seja aplicada apenas este princípio (diluição/extracção), no entanto sempre que necessário o princípio continua a ser utilizado, como por exemplo na separação das fibras durante a crivagem, para a distribuição das fibras na zona de formação da manta de pasta de um equipamento de lavagem, ou para homogeneizar a mistura de químicos com a pasta. ^[4]

1.4.2.2. DESLOCAMENTO

A lavagem por deslocamento tem em conta que há substituição do licor que se encontra na pasta pelo licor de lavagem, sem que exista mistura. Assim, o licor contido na pasta é todo deslocado pelo licor de lavagem e a mistura na interface entre o licor de lavagem e o licor contido na pasta deve ser minimizada. ^[3]

Um único andar com aplicação do princípio da lavagem por deslocamento é muito mais eficiente do que quando aplicado o princípio de diluição de extracção /diluição. Idealmente com um andar de deslocamento é possível remover todo o licor contido na pasta, assim como todas as substâncias dissolvidas, utilizando o mesmo volume de licor para fazer essa remoção. ^[4]

Na realidade ainda não se trabalha perto das condições ideais, uma vez que há mistura de licores na interface e o soluto sorvido pelas fibras não tem tempo para se difundir para o exterior das mesmas. ^[3]

No esquema seguinte está representado o princípio de lavagem por deslocamento, onde o licor de lavagem adicionado à pasta (1) empurra todo o licor presente na pasta, saindo como filtrado (2). Em situação ideal, o licor de lavagem desloca todo o licor que se encontrava na pasta (3).

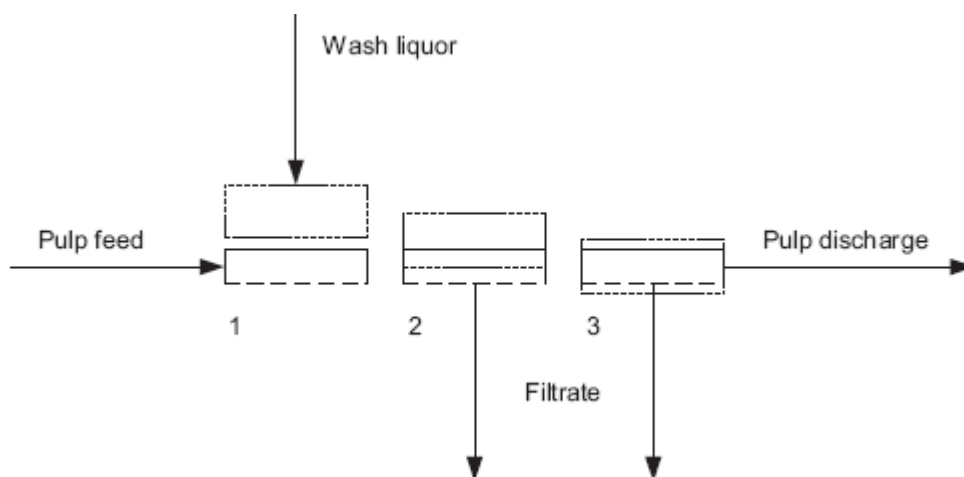


Figura 15- Ilustração do princípio da lavagem por deslocamento. ^[4]

1.4.2.3. DESIDRATAÇÃO COMPRESSIVA

Uma alternativa para retirar as substâncias indesejáveis que se encontram dissolvidas no licor, ainda presente na pasta, é por acção mecânica (prensagem). A desidratação compressiva encontra-se esquematizada na figura seguinte. A pasta entra para um dispositivo onde pode ser sujeito a pressão mecânica (1). Em (2) a pressão efectuada extrai o filtrado da manta de pasta. O filtrado obtido representa o licor livre que está em redor das fibras, no entanto, com a pressão exercida o licor presente nos espaços vazios das fibras também acaba por ser extraído (3).

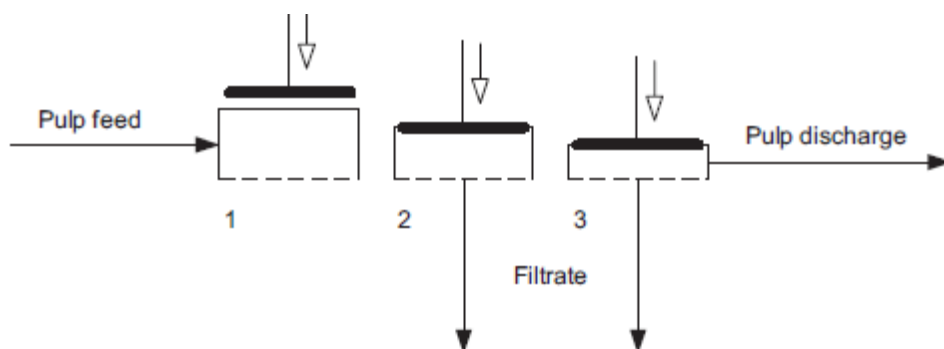


Figura 16- Princípio da desidratação compressiva. ^[4]

A desidratação compressiva diminui a quantidade de substâncias dissolvidas no licor que está agregado à pasta descarregada, reduzindo o volume de licor, enquanto na lavagem por deslocamento a concentração de licor altera-se.

As concentrações de licor que entra com a pasta, do filtrado e do licor que acompanha a pasta não devem sofrer alteração. Para isso o tempo antes da acção mecânica deve ser o suficiente para que o processo de difusão nas fibras se dê em toda a sua extensão. A alteração de concentração pode dever-se também a processos de absorção.

Na realidade há uma concentração superior no licor no interior das fibras em relação ao licor livre das fibras, dada a absorção ou o processo de difusão que é incompleta. Assim a concentração de descarga será mais elevada que a concentração de alimentação dado que o licor que é libertado no final da prensagem tem elevada concentração.

1.4.2.4. LAVAGEM MULTI-ESTÁGIOS

Normalmente, um só estágio não é suficiente para que a pasta à saída da zona de lavagem apresente as condições desejadas. Então é preciso uma lavagem multi-estágios, onde os equipamentos de lavagem devem operar em série, ou numa única peça de equipamento de lavagem multi-estágios. Tendo em conta a eficiência pretendida, o equipamento utilizado e o licor de lavagem que vai ser utilizado o número de estágios varia. ^[4]

Este sistema permite remover a maior quantidade de soluto quando a pasta é lavada com licor de lavagem sempre novo em cada estágio utilizado. No entanto

isso produz uma enorme quantidade de filtrado, bastante diluído, o que na prática não se torna viável. ^[4]

Hoje em dia é utilizado o princípio de contra-corrente, em que o fluxo de licor de lavagem circula em contra corrente ao da pasta. Isto permite que a pasta contacte com o licor mais limpo no último andar na lavagem. O filtrado que resulta no último estágio da lavagem, resulta do licor de lavagem introduzido no ultimo andar de lavagem, posteriormente direccionado para o andar anterior, para no final ser encaminhado para a evaporação. Por seu lado a pasta seguiu na linha oposta, como se pode ver na figura seguinte. ^[4]

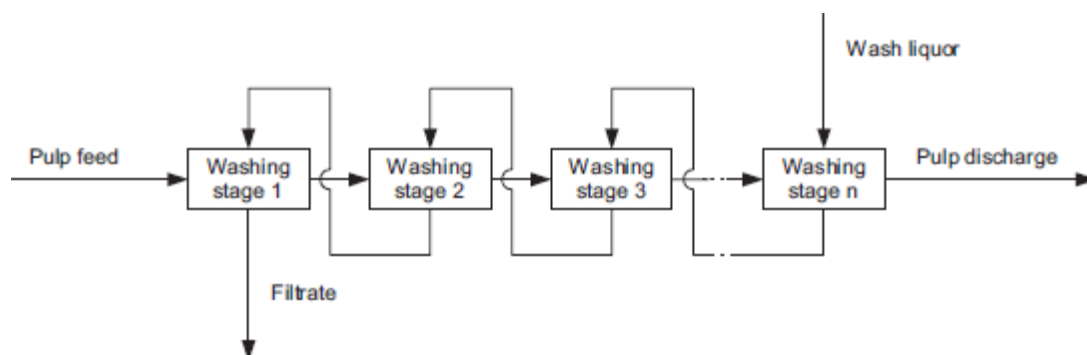


Figura 17- Representação esquemática do princípio de lavagem em contra-corrente num sistema de lavagem com n-estágios. ^[4]

1.4.2.5. LAVAGEM FRACCIONADA

A lavagem fraccionada é outra técnica que pode ser utilizada para realizar a lavagem da pasta. Tem como princípio o deslocamento em contra-corrente, baseando-se na aplicação fraccionada do licor de lavagem, sendo frequentemente aplicada em lavadores horizontais, caracterizando-se por uma eficiência mais elevada que a técnica anterior. ^[4]

Na figura seguinte está representado um sistema de lavagem com dois andares em contracorrente, onde é utilizada água limpa como licor de lavagem. Neste conceito de lavagem fraccionada, primeiro o filtrado mais sujo do segundo andar 2/1 é utilizado para deslocar a fracção de licor mais contaminada que foi alimentada em 1/1. De seguida, o filtrado introduzido em 2/2 é aplicado no andar 1/2, filtrado esse que é mais limpo uma vez que sofre mais diluição com o licor de lavagem.

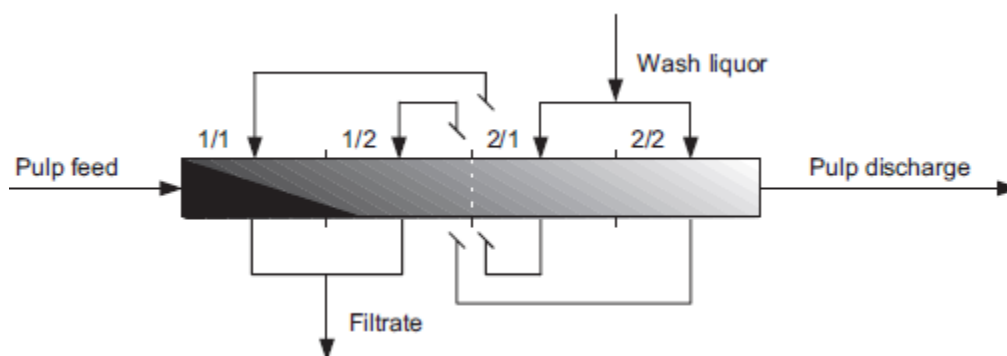


Figura 18-Representação do princípio da lavagem fraccionada com dois andares e sem mistura intermédia.

1.4.3. EQUIPAMENTOS DE LAVAGEM

Existem vários equipamentos que permitem fazer a lavagem da pasta e dentro de cada tipo, existem ainda vários designs diferentes. Apesar da oferta há várias considerações que se podem aplicar de um modo geral. Cada equipamento de lavagem deve ter associado uma área de drenagem, necessária para a desidratação inicial, uma área para aplicar o princípio do deslocamento e ainda ter em conta o espessamento final da pasta. Além disto, é necessário ter em conta o tempo requerido para que se dê a difusão. Neste ultimo ponto, as peças apresentam diferenças consideráveis. No caso de um lavador rotativo, passa pela etapa de lavagem em poucos segundos, enquanto, a etapa de difusão demora alguns minutos. Num equipamento de lavagem em que ambas as pastas, a da entrada e a da saída, são de média consistência, não requerem diluição entre os estágios. Neste caso, estão associados caudais mais baixos de licor de lavagem, assim como de filtrado, o que reduz as necessidades de bombagem e os consumos associados à evaporação. Este propósito verifica-se para equipamentos de média e também de alta consistência, sendo que nestes últimos está ainda associada outra vantagem. A quantidade de licor de lavagem com que se realiza a lavagem de pasta é pequena. Isto é uma mais-valia, uma vez que cada vez mais as fábricas baseiam a sua produção tendo em conta a eficiência energética e o baixo consumo de água. ^[4]

1.4.3.1. DIFUSOR DE PRESSÃO

O difusor de pressão é um lavador completamente fechado que opera sob pressão numa gama de consistências de 10-12%.

Este tipo de equipamento pode ser aplicado, no início da linha da lavagem e crivagem, logo após a saída do digestor, nos reactores de oxigénio e, por vezes, na linha de branqueamento. O design compacto apresentado por este difusor permite que este trabalhe com temperaturas altas.

O difusor de pressão é um equipamento onde se faz a primeira operação de lavagem. A pasta é alimentada pelo topo, enquanto o licor de lavagem que vai retirar licor negro da pasta vai ser alimentado pela parte lateral do difusor.

O licor extraído da pasta contém gases, que geralmente se encontram sobre a forma de bolhas de ar que se vão acumulando no cimo do difusor, à medida que o licor é extraído. Para evitar a acumulação de gases, existem perfuração no cimo do difusor, que depois permitem a saída de gases e também a alimentação da pasta ao equipamento.

Este equipamento é caracterizado por uma operação pressurizada, design fechado, consegue lavar a pasta a média consistência, tem custos baixos de manutenção, oferece alta disponibilidade diária e facilidade de operação. Distingue-se também pela elevada eficiência que se deve à elevada temperatura da lavagem a que opera, ao elevado tempo de retenção, que favorece mecanismo de difusão e ao bom deslocamento. ^[2]

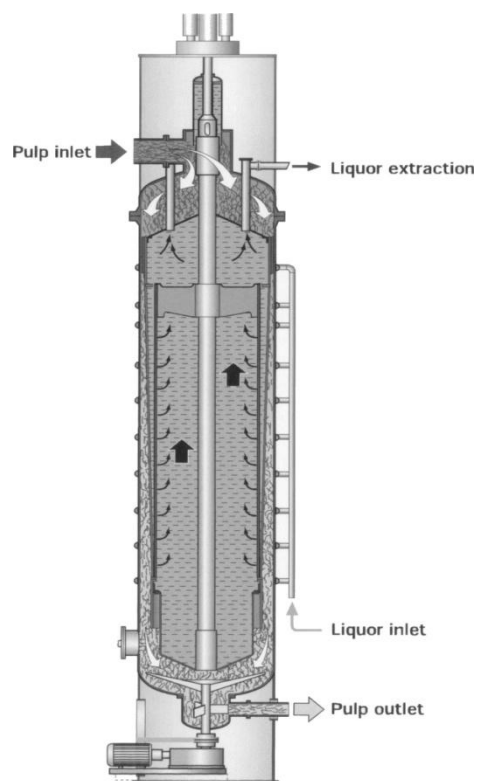


Figura 19- Esquema do difusor de pressão Kvaerner. ^[4]

O difusor de pressão é o equipamento que proporciona o estágio de pré-lavagem mais eficiente. O factor de eficiência de Norden pode situar-se entre os 4.0 e os 5.5. Para tal contribui o facto de o processo ser pressurizado, o que proporciona que o processo ocorra ausente de ar, eliminando a formação de espumas e a nível ambiental tem a vantagem de eliminar emissões de gases.

1.4.3.2. PRENSAS DE ROLOS

As prensas de rolos são equipamentos que estão instalados na linha da lavagem, uma vez que proporcionam baixos consumos de químicos, podendo ser também utilizadas na linha de branqueamento.

Estas prensas são lavadores bastante completos e eficientes dado que incluem diluição, espessamento, deslocamento e drenagem. Para além disso, a consistência de saída da pasta pode apresentar valores bastante aceitáveis, 30-40%.

As prensas destinam-se a pastas de baixa (3-5%) ou de média consistência (6-10%). A pasta entra para a prensa e forma-se a manta na zona de desidratação onde há um aumento de consistência para 8-12%, com acção dos rolos rotativos e do licor que se movimenta pelas perfurações existentes nos rolos. Quando a pasta sai da zona de desidratação e entra na zona de deslocamento, o licor de lavagem é adicionado à manta de pasta e este desloca o licor presente na pasta para o interior do rolo. No “nip” a pasta é pressionada até uma consistência de 30-35% para posterior descarga. O filtrado deixa os rolos através de aberturas nas extremidades dos rolos.

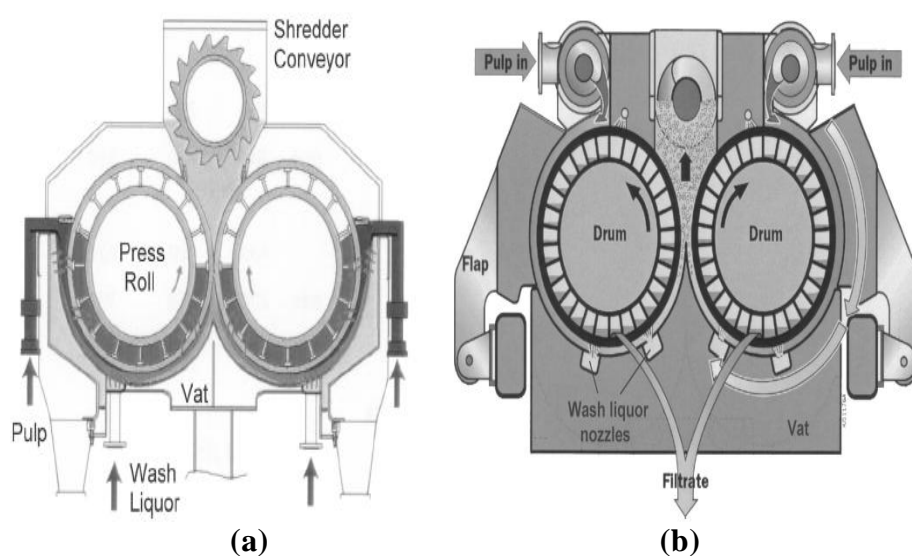


Figura 20- Representação esquemática da prensa de rolos, (a) The metso Twin roll press (b) The Kvanerner pulping Compact pressing. ^[4]

Em relação aos difusores, as prensas tem a grande vantagem da elevada consistência na descarga que conseguem alcançar. Isto tem em conta o facto de a quantidade de licor de lavagem por tonelada de pasta necessária ser apenas metade em relação ao equipamento de média consistência. Isto tem influência não só neste estágio, como nos seguintes, uma vez que, a pasta ao entrar com uma consistência mais elevada entra com menos licor agregado na pasta, reduzindo a quantidade de licor de lavagem que é necessário, havendo então menos produção de filtrado. A consistência de saída influencia também outras condições de operação, tais como a

temperatura e pH, que depois se reflectem no factor de diluição e na viscosidade da pasta, uma vez que estas são mais fáceis de controlar.^[4]

O factor E da prensa de lavagem tem valores perto de 1, enquanto o factor E_{10} varia num intervalo de 3-5. O design apresentado pelas prensas permite minimizar a formação de espumas das prensas, a emissão de gases e ainda permite que sejam alcançadas elevadas temperaturas no seu interior.

1.4.4. PARÂMETROS DE LAVAGEM

As condições de operação, incluindo os parâmetros específicos dos equipamentos, podem ser ajustadas para que eficiência de lavagem seja optimizada. Os parâmetros do processo que mais influenciam a operação de lavagem são o factor de diluição, a consistência da alimentação e da descarga, o pH, a temperatura.

1.4.4.1. FACTOR DE DILUIÇÃO

O factor de diluição é um parâmetro que expressa a quantidade de licor de lavagem que está a ser adicionado ao longo da lavagem da pasta. Na lavagem por deslocamento, o factor de diluição é igual a zero quando o licor contido na pasta fosse deslocado na sua totalidade, por uma quantidade de licor de lavagem igual. Um factor de diluição positivo significa que a pasta está a ser lavada com uma quantidade de licor de lavagem superior à quantidade de licor que deixa a pasta, o que vai fazer com que o filtrado seja diluído. O inverso se passa quando o factor de diluição é negativo, ou seja, a pasta é lavada com menos licor do que aquele que abandona a manta de pasta e o filtrado é reduzido.^[3]

Quando o factor de diluição é negativo há uma porção do licor que permanece na pasta, sem ser substituído, e que a vai acompanhar até à saída do lavador, o que faz prever que um estágio de lavagem quando opera com um factor de diluição com valor negativo não consegue operar na sua eficiência máxima.^[3]

Genericamente, num lavador, entra um fluxo de pasta com uma consistência de entrada, que tem uma certa quantidade de licor embebida. Ao mesmo tempo está a sair uma pasta de saída, com uma consistência de saída, juntamente com uma quantidade de licor. Em paralelo com isto está a entrar licor de lavagem que lava a pasta e que gera o filtrado. Estas operações geram as quatro correntes representadas no esquema seguinte. ^[3]

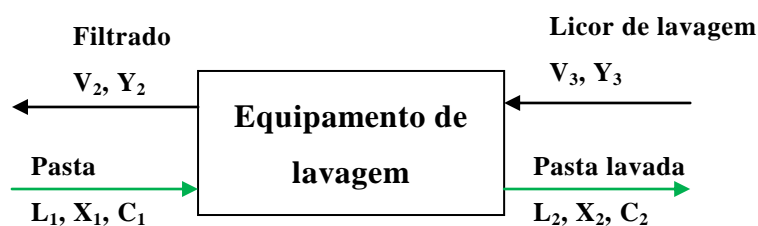


Figura 21- Representação esquemática das correntes (entrada e saída) de um equipamento de lavagem. ^[6]

A nível matemático, o factor de diluição pode ser definido como a diferença entre o caudal de licor de lavagem e o caudal que abandona o lavador junto com a pasta, a dividir pela produção de pasta:

$$FD = V_3 - L_2 \quad (3)$$

É evidente a relação entre a eficiência de lavagem e o factor de diluição, uma vez que a eficiência de lavagem melhora com o aumento do factor de diluição. No entanto, existe um máximo para a eficiência de lavagem que está relacionada com os limites físicos da penetração do licor na pasta.

De realçar no entanto que um factor de diluição elevado pode afectar a área a jusante da linha de pasta. No caso da lavagem, provoca requisitos adicionais na evaporação, enquanto, na linha do branqueamento o aumento do filtrado vai requisitar uma maior capacidade do tratamento dos efluentes líquidos.

Num sistema de lavagem multi-estágios todos os lavadores operam com factor de diluição igual, não ocorrendo transbordo ou falta de filtrado entre os estágios. Neste tipo de lavagem, o factor de diluição é controlado fixando o fluxo até ao último estágio de lavagem. ^[4]

1.4.4.2. CONSISTÊNCIA DA ALIMENTAÇÃO E DESCARGA

A consistência da alimentação tem uma influência significativa na zona de lavagem, assim como no consumo de energia eléctrica e no design do equipamento necessário. Uma consistência baixa na alimentação implica que são bombeados grandes volumes de filtrado para os pontos de diluição antes da lavagem, sendo necessária uma grande quantidade de energia para os bombear. Essa mesma consistência vai também implicar uma quantidade de licor elevada que tem de ser removida da manta da pasta, quando esta se encontra na zona de drenagem. ^[4]

Quando a pasta que é descarregada é de média consistência (12-14%), a quantidade de licor que está a acompanhar a pasta à saída do equipamento de lavagem é superior 6-7 vezes à quantidade de pasta, enquanto numa descarga de alta consistência, onde o equipamento de lavagem já é uma prensa, a razão entre a quantidade de licor e a quantidade de pasta reduz-se para 2. ^[4]

Assim uma descarga de alta consistência é mais eficaz, permitindo um melhor controlo entre estágios, onde se engloba o controlo de condições operacionais, por exemplo, temperatura, pH, definição do factor de diluição. ^[4]

1.4.4.3. pH

Num equipamento de lavagem, o pH é sempre ajustado tendo em conta o licor de lavagem de precedo do lavador anterior, assim como do próprio lavador anterior. Geralmente este parâmetro não se utiliza como parâmetro de lavagem, mas por vezes o ajuste do mesmo é viável para o processo.

O pH normalmente mantém-se estável num equipamento, no entanto, as oscilações não são impossíveis de acontecer, por exemplo, quando se lava um stock alcalino com um licor de lavagem ácido. Isto pode provocar a deposição de partículas à superfície do lavador, devido à precipitação de compostos orgânicos e inorgânicos. ^[4]

1.4.4.4. TEMPERATURA

A temperatura é uma variável influente na operação de lavagem. As altas temperaturas são benéficas para esta operação, uma vez que a viscosidade do licor é menor, aumentando a capacidade de drenagem. A difusão também é melhorada com o aumento de temperatura, que se reflecte num aumento da eficiência de lavagem, como reflecte a figura seguinte. ^[4]

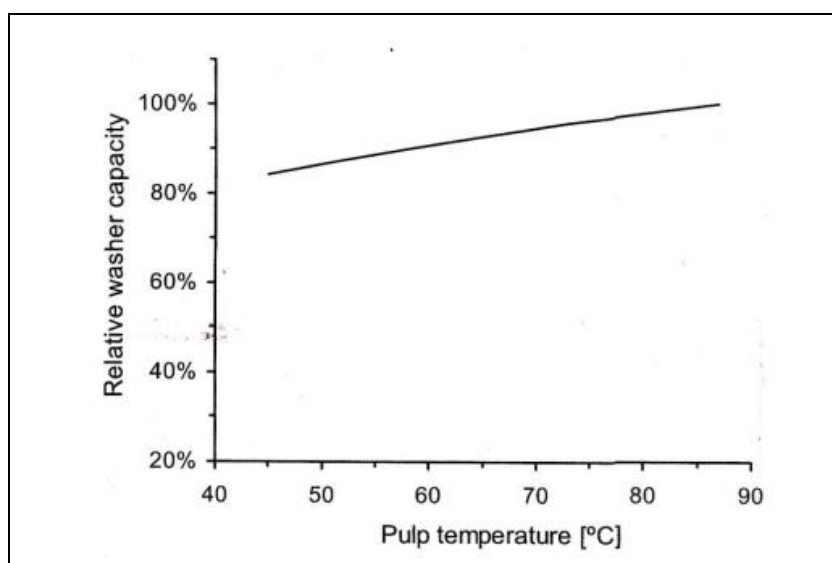


Gráfico 3- Variação da eficiência de lavagem com a temperatura da pasta. ^[4]

1.4.4.5. ENTRADA DE AR

A presença de ar na pasta que é alimentada ao equipamento de lavagem afecta negativamente a capacidade de lavagem do mesmo. As bolhas de ar presente na corrente que é alimentada ocupam espaços reduzindo os caminhos por onde circula o licor. Isto faz com que a taxa de drenagem seja menor, provocando também perturbações no deslocamento do licor o que influencia a eficiência da lavagem do equipamento.

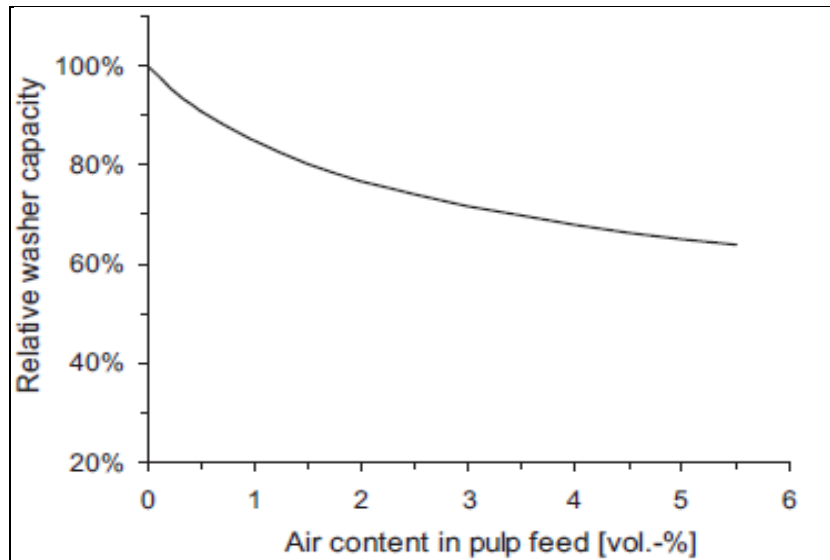


Gráfico 4- Variação da eficiência de lavagem com o ar presente na pasta alimentada.^[4]

1.4.5. EFICIÊNCIA DE LAVAGEM

Existem vários parâmetros com os quais se pode caracterizar os equipamentos de lavagem, entre os quais, a razão de deslocamento, RD , o factor de eficiência de Norden, E , o rendimento de lavagem, Y , e a eficiência de remoção de CQO, ER .

Tendo em conta o esquema ilustrativo de um equipamento de lavagem (*Figura 21*) são definidos em seguida os parâmetros que permitem a caracterização de um equipamento de lavagem, já referenciados no parágrafo anterior.

1.4.5.1. RAZÃO DE DESLOCAMENTO, RD

$$RD = \frac{X_1 - X_2}{X_1 - Y_3} \quad (4)$$

Este parâmetro permite avaliar o desempenho dos estágios de lavagem, desde que a razão de licor de lavagem não se altere, tendo em conta o quociente expresso que relaciona a redução de sólidos dissolvidos e a redução máxima de

sólidos dissolvidos. Baseia-se na premissa que a pasta lavada não pode ter menor CQO que o licor de lavagem e ainda que a consistência da pasta não se altera no processo de lavagem. ^[3]

1.4.5.2. RAZÃO DE DESLOCAMENTO EQUIVALENTE, RDE

$$RDE = 1 - (1 - RD) \times DCF \times ICF \quad (5)$$

Onde:

$$DCF = \frac{L_D}{7.333} \quad (6)$$

$$FD = V_3 - L_2 \quad (7)$$

$$ICF = \frac{99 \times (L_V + FD)}{L_V \times (99 + FD) - L_D \times (99 - L_V) \times (1 - RD)} \quad (8)$$

$$L_V = \frac{100 - C_V}{C_V} \quad (9)$$

$$L_D = \frac{100 - C_D}{C_D} \quad (10)$$

Este parâmetro é utilizado como ferramenta de comparação entre equipamentos de lavagem, onde as pastas de alimentação e descarga têm consistências diferentes. Exprime o desempenho do equipamento de lavagem em estudo, considerando um equipamento a operar com consistências de 1% para a pasta que lhe é alimentada e de 12% para a pasta que é descarregada desse mesmo lavador. É considerado o mesmo factor de diluição e as mesmas perdas para o equipamento de lavagem hipotético e para o lavador em estudo. As perdas são definidas pela diferença entre a quantidade de sólidos que sai com o fluxo de pasta lavada e a quantidade de sólidos que entram com o licor de lavagem. ^[3]

1.4.5.3. EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE CQO, ER

$$ER = \frac{X_1 - X_2}{X_1} \times 100\% \quad (11)$$

A partir deste parâmetro, independente da consistência da pasta, é possível avaliar a eficiência da lavagem, uma vez que este nos permite calcular uma relação entre a quantidade de sólidos que está a entrar num equipamento de lavagem e a quantidade de sólidos presentes na pasta de descarga desse equipamento. ^[3]

1.4.5.4. RENDIMENTO DE LAVAGEM, Y

$$Y = \frac{V_2 \times Y_2 - V_3 \times Y_3}{L_1 \times X_1} \quad (12)$$

$$Y = \frac{V_2 \times Y_2}{L_1 \times X_1} \quad (13)$$

O rendimento de lavagem exprime a relação entre a quantidade de sólidos dissolvidos que saem da lavagem, dado pela diferença entre o licor de lavagem e o filtrado e a quantidade de sólidos que entra no equipamento de lavagem. ^[3]

A equação 17 é baseada na premissa de que o teor em CQO do licor de lavagem é nulo, sendo válida quando o licor de lavagem que está a ser introduzido na linha é água. ^[3]

1.4.5.5. FACTOR DE EFICIÊNCIA DE NORDEN, E

$$E = \frac{\ln \left[\left(\frac{L_1}{L_2} \right) \times \frac{X_1 - X_2}{X_1 - Y_3} \right]}{\ln \left(\frac{V_3}{L_2} \right)} \quad (14)$$

O factor da eficiência de Norden depende do equipamento de lavagem, do modo de operação do equipamento, da pasta que é fornecida para ser lavada, da temperatura e das substâncias envolvidas no licor e ainda dos fenómenos de difusão e de sorção.

Ao contrário da razão de deslocamento, este parâmetro só depende do factor de diluição, o que é muito relevante a nível industrial.

Este parâmetro indica o número de andares ideais de lavagem necessários, em contracorrente, de modo a obter pasta lavada com as mesmas características da pasta lavada numa unidade fabril. Para que seja viável a comparação entre as várias unidades de lavagem, tendo em conta este parâmetro, é relevante que a consistência não se altere, no entanto, este parâmetro só depende da consistência de descarga da pasta. ^[3]

Dada a dificuldade crescente de comparação da eficiência de lavagem foram reformulados os parâmetros de caracterização dos equipamentos de lavagem. ^[3]

A comparação é feita usando como referência um lavador de vácuo operando a 1% de consistência à entrada e 12% à saída. ^[3]

1.4.5.6. FACTOR DE EFICIÊNCIA DE NORDEN MODIFICADO, E_{MOD}

$$E_{\text{mod}} = \frac{\ln \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right) \times \left(\frac{X_1 - X_2}{X_2 - Y_3} \right) \right]}{\ln \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right) \times \frac{X_1 - X_2}{Y_2 - Y_3} + \frac{Y_2 - X_2}{Y_2 - Y_3} \right]} \quad (15)$$

$$P_1 = \frac{100}{C_v} - 1 \quad (16)$$

$$P_2 = \frac{100}{C_D} - 1 \quad (17)$$

A eficiência de Norden modificada, à semelhança da eficiência de Norden, representa o número de andares ideais de lavagem em contra corrente que são necessários para obter pasta lavada com as mesmas características da que é obtida na unidade fabril. Este parâmetro tem a particularidade de não depender dos caudais das correntes que passam no equipamento de lavagem, o que é vantajoso, uma vez que essas medições podem ter erros associados.

A dependência relevante que existe deste parâmetro prende-se com o factor de diluição que está continuamente a ser estudada para optimização do sistema e diminuição da influência da mesma. ^[3]

1.4.5.7. FACTOR DE EFICIÊNCIA DE NORDEN, E₁₀

$$E_{10} = \frac{\ln \frac{L_1(X_1 - Y_2)}{L_2(X_2 - Y_3)}}{\ln \left(1 + \frac{FD}{8.1} \right)} \quad (18)$$

À semelhança da eficiência de Norden modificada este parâmetro indica o número de andares ideais de lavagem em contra corrente que são necessários para obter a pasta com as mesmas características da que é obtida na fábrica. ^[3]

Este parâmetro tem em conta um pressuposto onde se assume um valor standard de 10% para a consistência de descarga da pasta, de modo a que exista uma forma de comparação com outros equipamentos de lavagem, em particular, os lavadores. ^[3]

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. FÁBRICA DA CELBI

2.1.1. BREVE DESCRIÇÃO/ LAYOUT

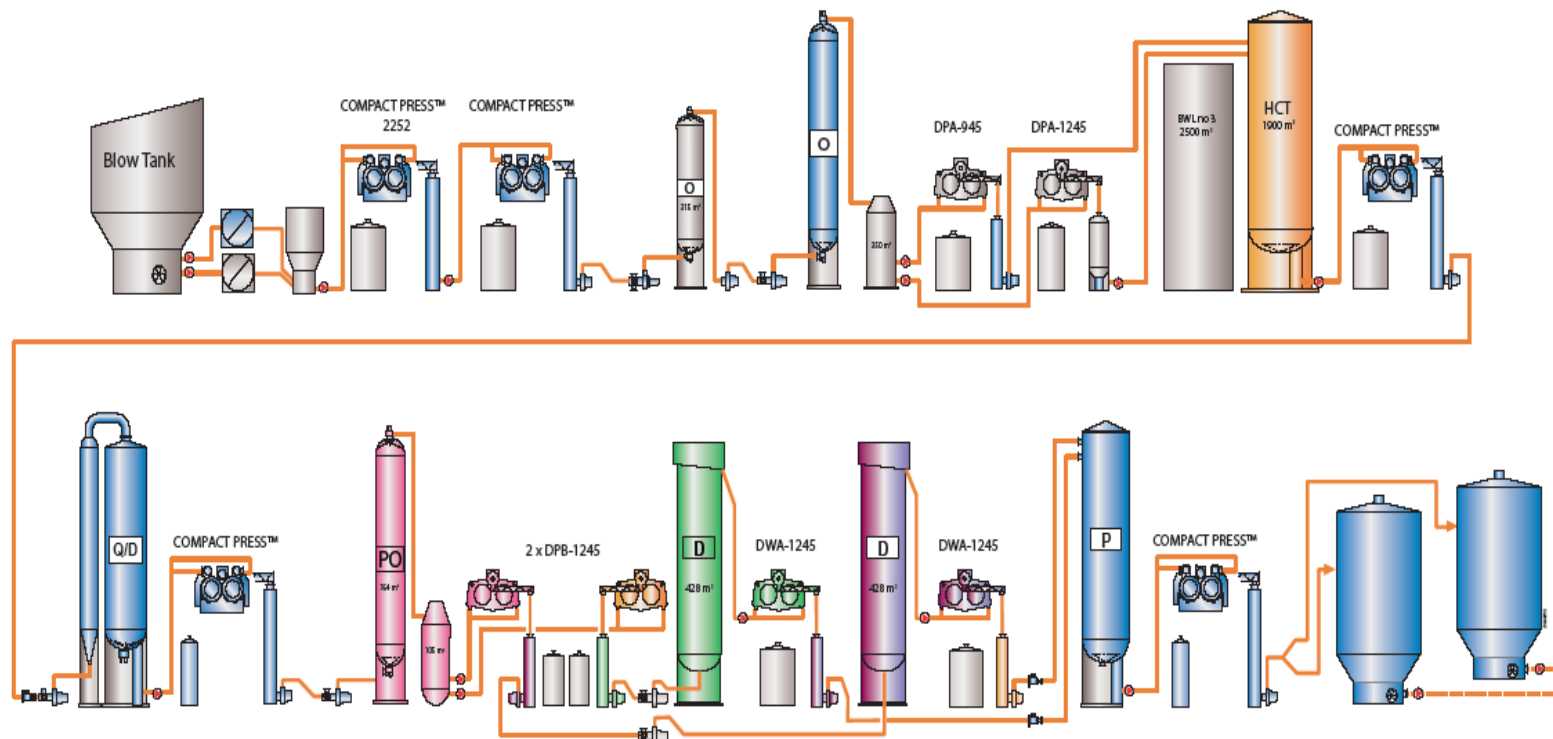


Figura 22- Diagrama esquemático do layout da Celbi. ^[11]

A linha de produção de pasta da Celbi é constituída por várias etapas, entre as quais, a preparação de madeira, o digestor, a lavagem, crivagem e oxigénio e o branqueamento. Neste trabalho estão em estudo a linha da lavagem, crivagem e oxigénio e a linha de branqueamento.

A madeira depois de preparada entra no digestor, onde se dá o cozimento e a deslenhificação da mesma. Dá-se ainda uma etapa de pré-lavagem na parte inferior deste equipamento, antes da pasta crua ser encaminhada para os dois difusores de pressão, difusor 1 e difusor 2, que estão a funcionar em paralelo.

O passo seguinte é a crivagem, onde há uma separação por tamanhos dos nós e dos incozidos, tendo em conta as perfurações dos vários crivos. Os nós são reenviados para o cozimento e o rejeitados da ultima etapa de crivagem são purgados. Ao mesmo tempo a pasta passa para um tanque de descarga, de onde segue para a da linha de lavagem.

A sequência da lavagem é constituída por quatro prensas, designadamente, prensa 2252 (Prensa 1), prensa 1545 (Prensa 2), e ainda as prensas 945 e 1245 (Prensa 3A e 3B, respectivamente) que se encontram a funcionar em paralelo. Nesta linha existem também os reactores de oxigénio que se localizam logo de seguida à prensa 2. A pasta resultante desta linha, pasta semi-branqueada, é descarregada num tanque de armazenagem que depois alimenta a linha do branqueamento. (*Figura 22*)

A pasta resultante da prensa 1, pasta de alta consistência, sofre uma diluição com filtrado vindo da prensa seguinte, em contra corrente, ficando a pasta com média consistência, sendo depois alimentada á prensa seguinte, prensa 2.

Nos reactores de oxigénio há reacção de oxidação com o oxigénio, através do mecanismo radicalar, indicado na *Figura 11*, constituído por três passos, a iniciação, a propagação e a terminação, sendo o mais longo o passo intermédio, uma vez que é aí que se dá quase a reacção.

A linha de branqueamento é constituída por sete prensas cinco reactores que estão distribuídos de acordo com a seguinte sequência: prensas 1545; **(Q/D)** + prensas 1545; **(PO)** + duas prensas DPB 1245; **(D1A e D1B)** + duas prensas DWA 1545; e **P** + prensa 1545. (*Figura 22*)

A pasta semi-branqueada, pasta resultante da linha da lavagem, entra na sequência do branqueamento a partir da primeira prensa que tem também características alcalinas, à semelhança da linha da lavagem. À pasta alimentada na prensa precedeu um processo de diluição com caudal de filtrado para baixar a consistência da mesma, tendo em conta que no tanque a pasta tende a ser armazenada com altos valores de consistência. Após passagem nesta prensa, a pasta vai ser alimentada pelo topo 1º reactor, reactor (**Q/D**), com auxílio de um dropleg. Dado que a pasta é proveniente da linha da lavagem, que pertence ao circuito alcalino, é necessária uma etapa de acidificação da pasta com licor residual, para posterior acção do agente de branqueamento utilizado, no caso, o dióxido de cloro.

Do reactor a pasta é encaminhada para a prensa dois pertencente ao circuito ácido, como se encontra esquematizado na *Figura 25*, onde se dá uma etapa de lavagem, para remover alguma lenhina residual que ainda possa existir agregada e prensagem, sendo o objectivo essencial atingir a brancura pretendida. A pasta à saída da prensa, pasta de elevada consistência, é alimentada a um tanque secundário onde sofre diluição para posteriormente ser alimentada ao reactor **PO** pelo fundo do mesmo.

No reactor **PO** é utilizado o peróxido de hidrogénio e o oxigénio em condições de pH próximas de 11. Tendo em conta as condições do meio neste reactor e as condições ácidas provenientes do reactor anterior, há necessidade de criar alcalinidade no meio, para que os agentes de branqueamentos utilizados nesta etapa tenham as condições óptimas para que ocorram as respectivas reacções de decomposição dos mesmos.

Após a acção dos agentes de branqueamento neste reactor, a pasta descarregada pelo topo do reactor é encaminhada para as prensas 3A e 3B que funcionam em paralelo, no circuito alcalino. Quando a pasta é descarregada, à semelhança do que ocorre nas outras prensas é necessária mais um processo de diluição antes da alimentação as torres **D1A** e **D1B** para mais uma acção do dióxido de cloro, tendo em conta a brancura da pasta pretendida. Nesta etapa de branqueamento é necessário promover novamente condições ácidas, dado as condições de decomposição deste agente.

À semelhança do que ocorre no primeiro reactor, também no **(D1A D1B)** é utilizado o dióxido de cloro, sendo mais uma vez necessária a acidificação da pasta para ter reunidas as condições onde o agente actue. Caso contrário a reacção não tem as condições de meio para ocorrer em toda a sua extensão, o que depois se reflecte no nível de brancura alcançada.

A pasta resultante de mais uma etapa de branqueamento é depois encaminhada para mais uma linha de prensas, prensas 4A e 4B, para mais uma etapa de limpeza, onde se pretende retirar o licor ainda existente, sendo que nas prensas 4A e 4B, também a funcionar em paralelo, o licor de lavagem introduzido é água limpa, uma vez que estas prensas já estão no final da linha de pasta, sendo pretendido retirar impurezas que ainda possam existir, o que faz com que o licor de lavagem introduzido deva ser limpo em relação a pasta que está a ser lavada. Como a pasta encaminhada para estas prensas passou por uma etapa ácida, nesta etapa de lavagem e prensagem, vai resultar um filtrado ácido, o que faz com que também as prensas 4A e 4B pertençam ao circuito ácido.

A pasta resultante das prensas segue para um tanque secundário onde se dá a diluição para posteriormente ser alimento ao último reactor instalado, reactor **P**.

No reactor **P** é utilizado o peróxido de hidrogénio que actua em condições do meio alcalinas, havendo necessidade de criar condições de alcalinidade do meio, com recurso a uma base forte, por exemplo, o hidróxido de sódio. A pasta descarregada pelo fundo do reactor é encaminhada para a alimentação da última prensa da sequência do branqueamento, sendo descarregada com elevada consistência. A pasta branqueada segue para o tanque de armazenamento de pasta, até ser encaminhada para a secção da máquina de secagem, onde se procede a secagem e formação de folha de pasta que no seu conjunto dará origem a fardo de pasta.

Ao longo da instalação existem dois circuitos diferentes, o circuito ácido e o circuito alcalino, tendo em conta que na linha de branqueamento a pasta vai estando sujeita a mudanças de condições de pH para permitir as condições de actuação dos agentes de branqueamento. Estas diferentes condições na pasta vai depois fazer com que o filtrado resultante após a passagem da pasta pela prensas, seja ácido ou alcalino, dependendo se a pasta vêm de um reactor com características ácidas ou alcalinas. Assim o filtrado resultante da prensa 2 e 4 tem pH ácido, e

estas prensas constituem o circuito ácido, circuito aberto da fábrica. Já o circuito alcalino é um circuito fechado da instalação constituído pelas restantes prensas constituintes da linha do branqueamento e também pela linha da lavagem, como se pode ver na *Figura 25*.

O circuito de filtrado e a linha de pasta circulam em contra corrente, permitindo maior eficiência na remoção uma vez que o licor de lavagem mais limpo encontra-se com a pasta mais limpa também, sendo esta situação possível apenas neste modelo. Quando o licor de lavagem chega ao início da linha de lavagem, já como licor negro, tem contacto com a pasta castanha (pasta alimentada à linha de lavagem).

A existência de dois circuitos diferentes permite que haja a utilização do filtrado proveniente da prensa anterior, considerando o circuito de filtrado, tanto para promover a diluição de pasta de elevada consistência para baixa consistência, assim como, para utilizar como licor de lavagem. Esta reutilização do filtrado produzido para além de diminuir a quantidade de efluente emitido permite também diminuir a quantidade de água utilizada no processo.

2.2. ENSAIOS REALIZADOS NA UNIDADE INDUSTRIAL

2.2.1. OBJECTIVOS

Os objectivos do trabalho passaram, em primeiro lugar, por um estudo do processo de deslenhificação por oxigénio e branqueamento de pasta. De seguida foi realizada uma caracterização laboratorial da pasta e filtrados em cada andar de lavagem para posterior determinação da eficiência de lavagem em cada um dos equipamentos de lavagem presentes na linha de produção de pasta.

Outros objectivos deste trabalho passaram pelo estudo do modelo de controlo do factor de diluição implementado na instalação sendo feita posteriormente alteração do mesmo para estudo da resposta do sistema. Esta alteração teve em conta o objectivo baixar os níveis dos tanques de filtrados, bem como a influência na eficiência de lavagem. Posteriormente pretende-se otimizar o factor de diluição tendo em conta uma melhor operação dos equipamentos de lavagem, permitindo valores mais elevados de eficiência de lavagem.

2.2.2. CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL DA PASTA E FILTRADOS EM CADA ANDAR DE LAVAGEM

Um dos objectivos principais deste trabalho passa pela caracterização da linha de produção de pasta, o que engloba o estudo dos equipamentos da linha de lavagem assim como da linha do branqueamento. Para isso vão ser colhidas amostras de pasta à saída do digestor, dos dois difusores; no caso das prensas da lavagem e do branqueamento são colhidas amostras da pasta de alimentação e de descarga de pasta. O licor de lavagem e filtrado também são recolhidos na entrada e saída, respectivamente, de cada equipamento de lavagem. Os pontos de colheita estão representados, de forma esquemática, na figura seguinte.

As amostras recolhidas são amostras instantâneas sendo necessário depois ter acesso as condições de operação recorrendo à da hora de colheita, para posterior recolha de dados, que são imprescindíveis para o cálculo dos parâmetros que caracterizam cada um dos equipamentos. As amostras são colhidas e

analisadas no próprio dia e a análise laboratorial só será feita depois do arrefecimento da mesma até temperatura ambiente.

A análise das amostras das pastas colhidas foi realizada tendo em conta o método do ensaio expedito Celbi C-40 , método interino baseado na ISO 15702:2002. Para tal foi feita a análise da consistência e do CQO, a partir do método já referido.

Uma pequena quantidade da amostra colhida previamente pesada é lavada, retirando assim todo o licor negro agregado na pasta, sendo recolhido esse filtrado. Esse filtrado permitirá, após se proceder a diluição, se necessário, num balão volumétrico de onde posteriormente se retira uma pequena quantidade para um tubo adequado (tubo Dr Lange), com capacidade de suportar elevadas temperaturas, a partir do qual se dará a reacção que depois permite determinar o valor do CQO.

A consistência é determinada após a folha de pasta formada atingir peso constante, após algumas horas na estufa.

Para determinação da eficiência de lavagem analisou-se a carência química de oxigénio (CQO) para o licor de lavagem e filtrado, assim como para as pastas de alimentação e descarga; no caso das amostras de pastas é também calculada a consistência.

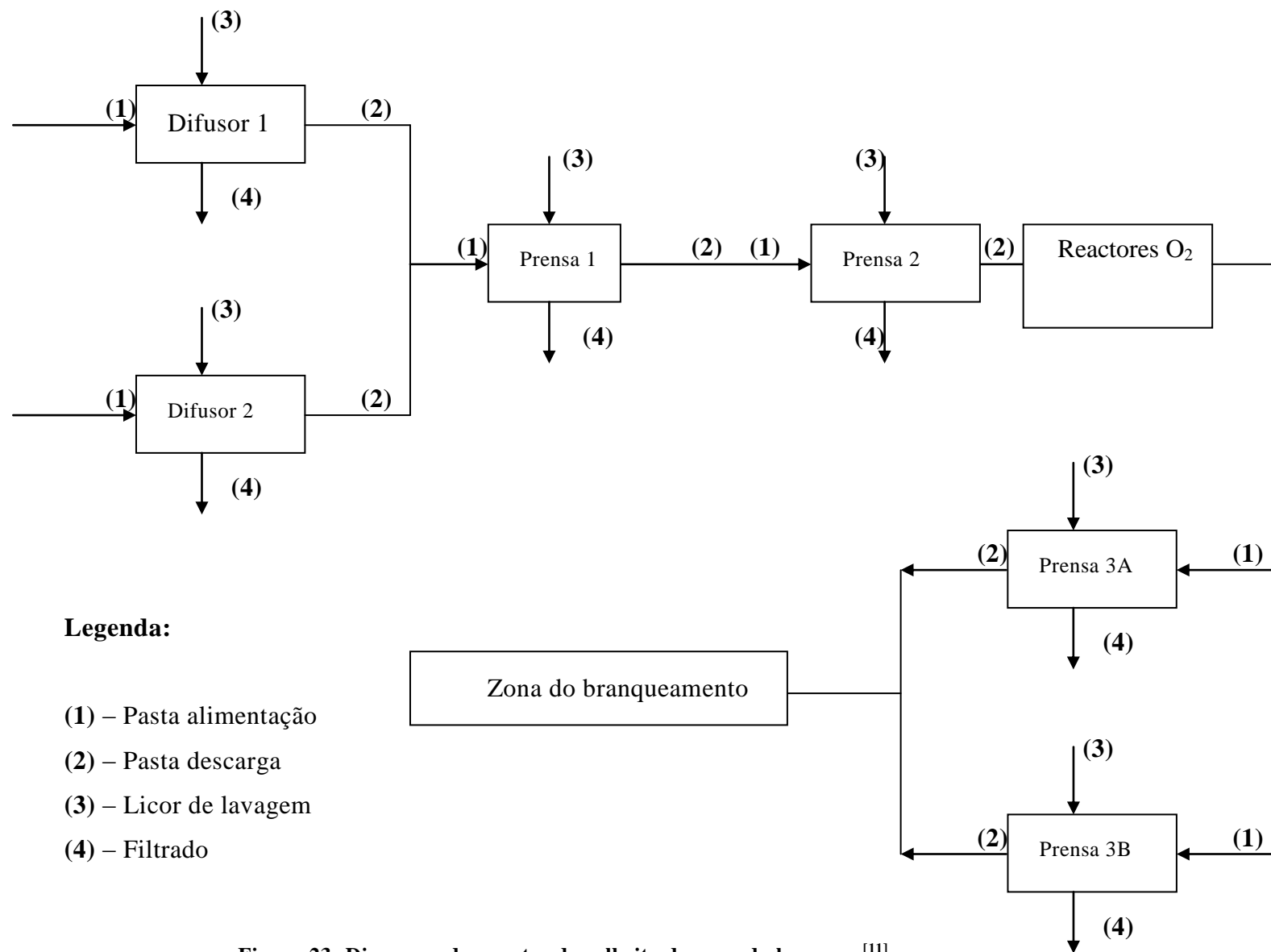


Figura 23- Diagrama dos pontos de colheita da zona da lavagem.^[11]

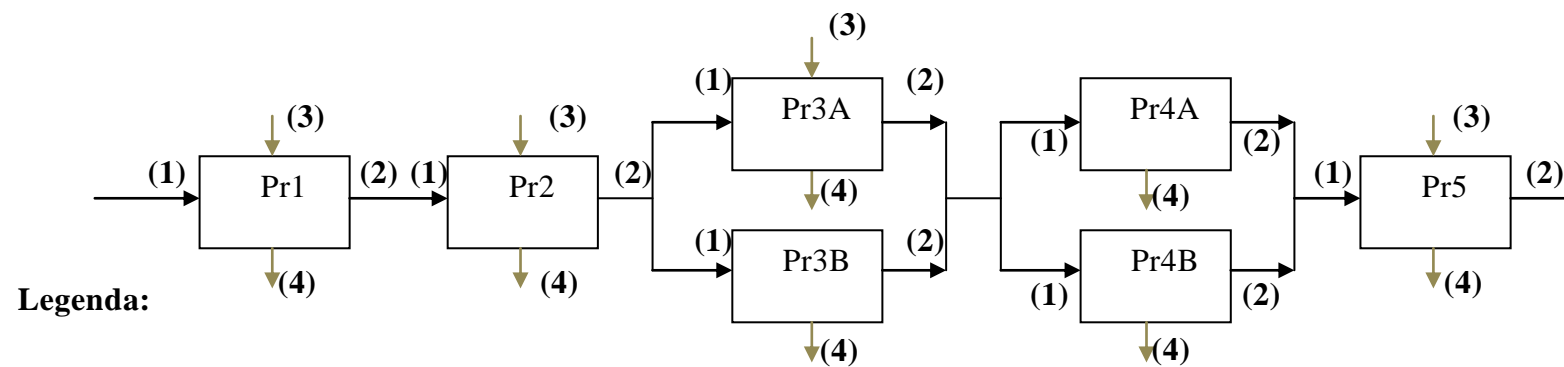


Figura 24- Diagrama dos pontos de colheita da zona do branqueamento. ^[11]

2.2.3. ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DA VARIAÇÃO NO SET-POINT DO FACTOR DE DILUIÇÃO (FD)

Com base no modelo de controlo instalado para controlo do factor de diluição pode-se verificar que para o *set-point* deste contribui o valor que está a ser medido, assim como a variação de nível que se verifica entre o valor medido e o *set-point* pretendido para o nível do tanque de filtrado da prensa do andar anterior, já que circuito de filtrado e pasta estão em contra corrente. Ainda neste cálculo há um correctivo que tem um valor experimental, tendo em conta a geometria do tanque e a sua capacidade.

A equação de cálculo referida ao longo da discussão de resultados serve para o cálculo do *set-point*, e está introduzida na programação de controlo da unidade industrial. De seguida está apresentada a fórmula, no caso para a prensa 2 do branqueamento, no entanto, para a outra prensa, os parâmetros a considerar são semelhantes,

$$FD_{SP} = \frac{FD_{me,4A} + FD_{me,4B}}{2} + \frac{[(-1) \times (Me - Sp)_{4A} + (-1) \times (Me - Sp)_{4B}] * Fc}{2} \quad (1)$$

No circuito alcalino, circuito fechado da instalação, a água da rede é alimentada na prensa 5 do branqueamento e efectua-se a lavagem nesta prensa, sendo também nesta prensa que se define o valor do factor de diluição a que o processo vai operar. Tendo em conta este valor definido e a variação de nível do tanque de filtrado, a prensa seguinte do circuito alcalino, prensa 3, como se pode ver na *Figura 25*, vai variar de modo a que o nível do tanque se ajuste para o *set-point* definido, evitando situação de transbordos. Assim se passarmos a operar com um valor de factor de diluição mais elevado na prensa 5, a corrente de filtrado dessa prensa tende a ser maior, aumentando o nível do tanque, o que faz com que na prensa anterior o factor de diluição aumente, compensando assim a maior quantidade de filtrado. O mesmo se passa na prensa 3 que leva a um aumento do FD também da prensa 1. Este aumento do factor de diluição é feito tendo em conta a variação apenas *no set-point* da prensa da prensa 5. As alterações nas outras prensas são respostas do sistema, tendo em conta o modelo de controlo

do factor de diluição e dos valores de *set-point* introduzidos tanto para factores de diluição como níveis de tanque.

Um aumento de caudal no licor de lavagem também vai provocar maior corrente de saída de filtrado, o que leva a um ajuste no factor de diluição na prensa para onde esse filtrado segue, após passagem no respectivo tanque. Quando o nível do tanque fica acima do *set-point* definido é necessário retirar licor desse mesmo tanque, o que faz com que é preciso aumentar o factor de diluição da prensa anterior retirando; tendo em conta que em nenhum dos tanques o objectivo não é ter o nível medido acima do valor do *set-point* definido este aumento vai ser sequenciado ate que este aumento do nível seja repostado. O próprio modelo de controlo provoca as alterações no processo para que este tenda novamente para os valores próximos do *set-point*.

Se o nível de um tanque ficar abaixo do valor definido é necessário baixar o factor de diluição da prensa para onde o filtrado desse mesmo tanque está a ser encaminhado, ou em alternativa, aumentar o valor do factor de diluição da prensa que envia a corrente de filtrado. Não é possível aumentar para valores muito elevados, daí que as vezes possa haver uma conjugação de variáveis tendo em vista um melhor controlo da operação.

Tendo em conta a realização deste ensaio, numa primeira fase foi alterado o valor do *set-point* para as prensas 5 e 4 do branqueamento, alterando o valor de 1,5 para 1,8 m³/tpsa. Esta alteração só foi realizada para estas prensas dado que são estas que estão no inicio dos circuitos alcalino (prensa 5 BRANQ) e ácido (prensa 4 BRANQ).

Dado a maior quantidade de filtrado produzido, devido ao maior caudal de lavagem requerido pelo aumento do FD, para evitar acumulação nos tanques e em situação extrema transbordo dos mesmos, nas prensas 1 e 2 do branqueamento foi feito um ajuste no valor do factor correctivo presente na equação que permite calcular o valor do factor de diluição destas prensas. Assim foi dado um incremento nestes factores correctivos já referidos. Com isto é possível dar mais peso ao factor de diluição, fazendo circular o filtrado entre os tanques, sem que se dê acumulação de filtrado, evitando assim os transbordos.

Depois das alterações e estabilizada a linha de produção foram retiradas amostras de pasta na alimentação e descarga das prensas assim como na linha dos filtrados, para posterior análise laboratorial e de resultados.

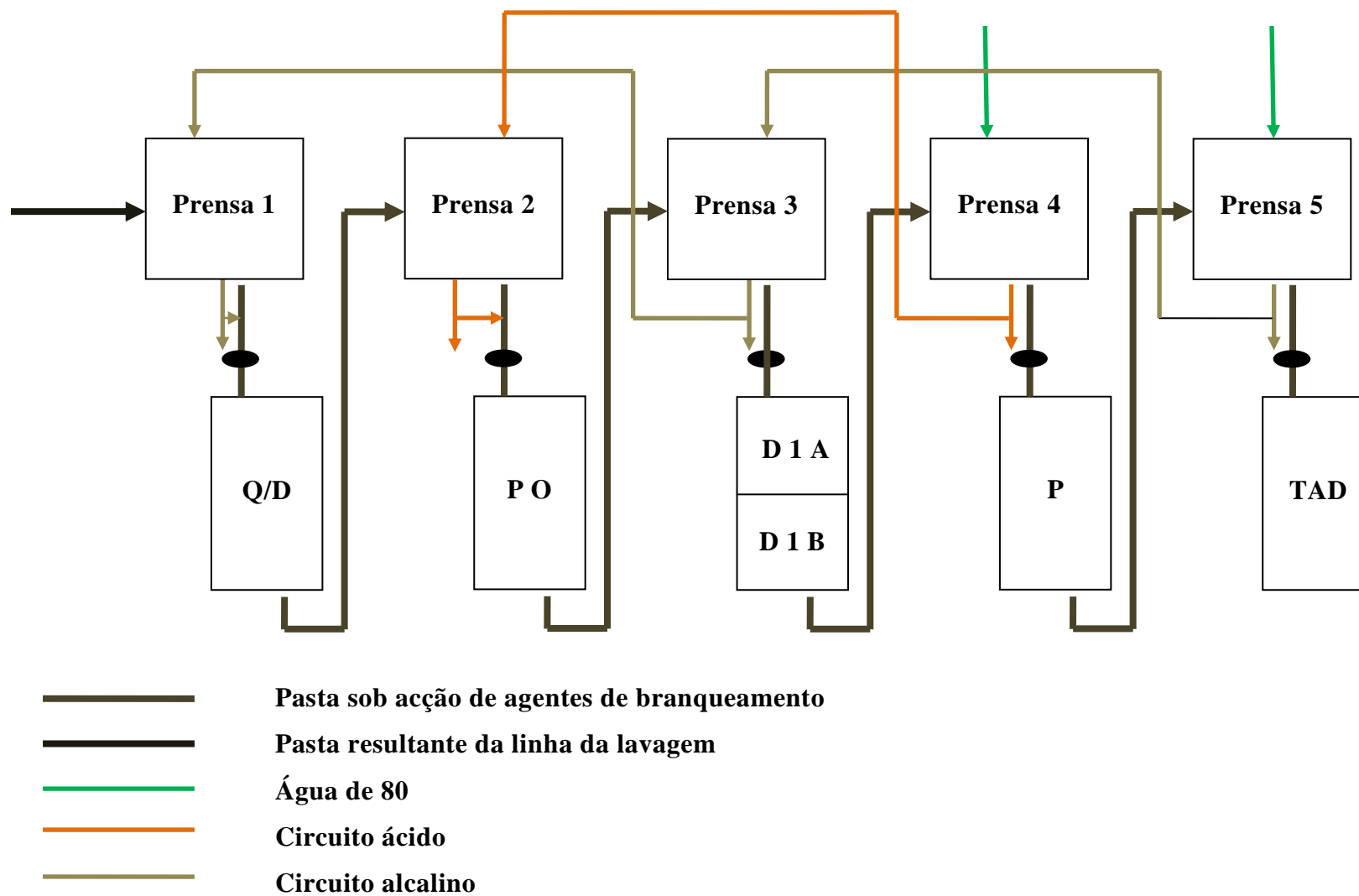


Figura 25- Diagrama esquemático dos circuitos alcalino e ácido da zona do branqueamento. ^[11]

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA LINHA DE PASTA

De seguida estão apresentados, em forma gráfica, os resultados obtidos após análise das amostras colhidas, no digestor, assim como ao longo da linha da lavagem e crivagem com oxigénio (LCO).

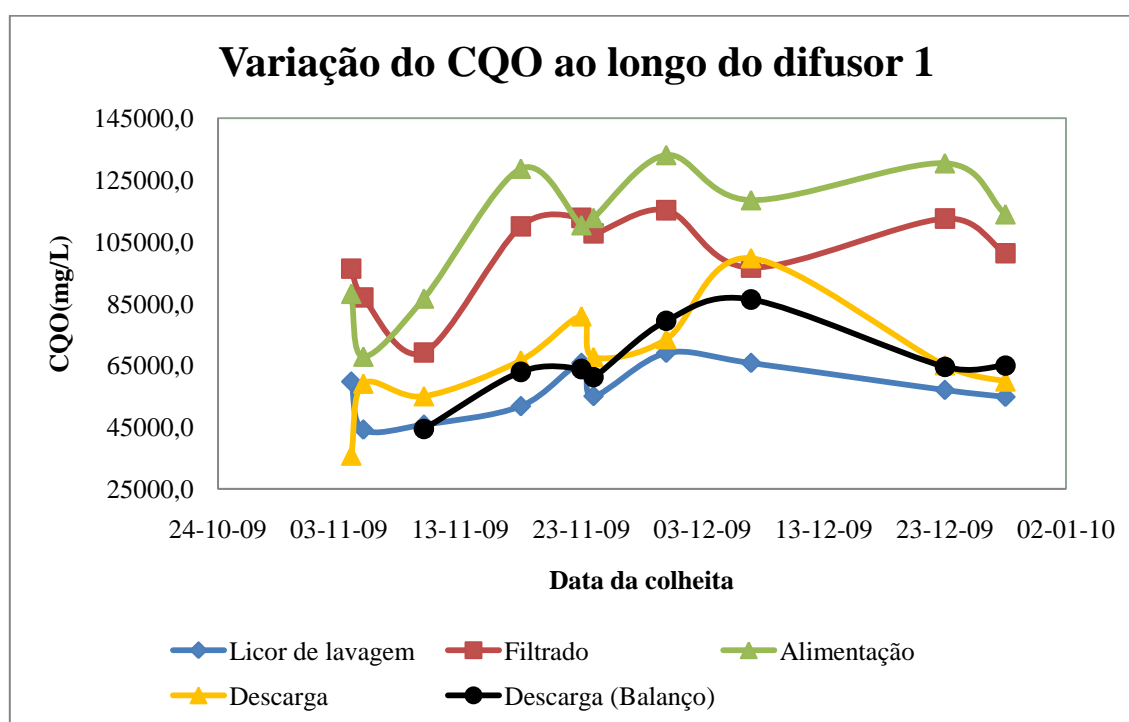


Gráfico 5- Representação da evolução do CQO (mg/L) ao longo do Difusor 1, tendo em conta a colheita de amostras que foi realizada.

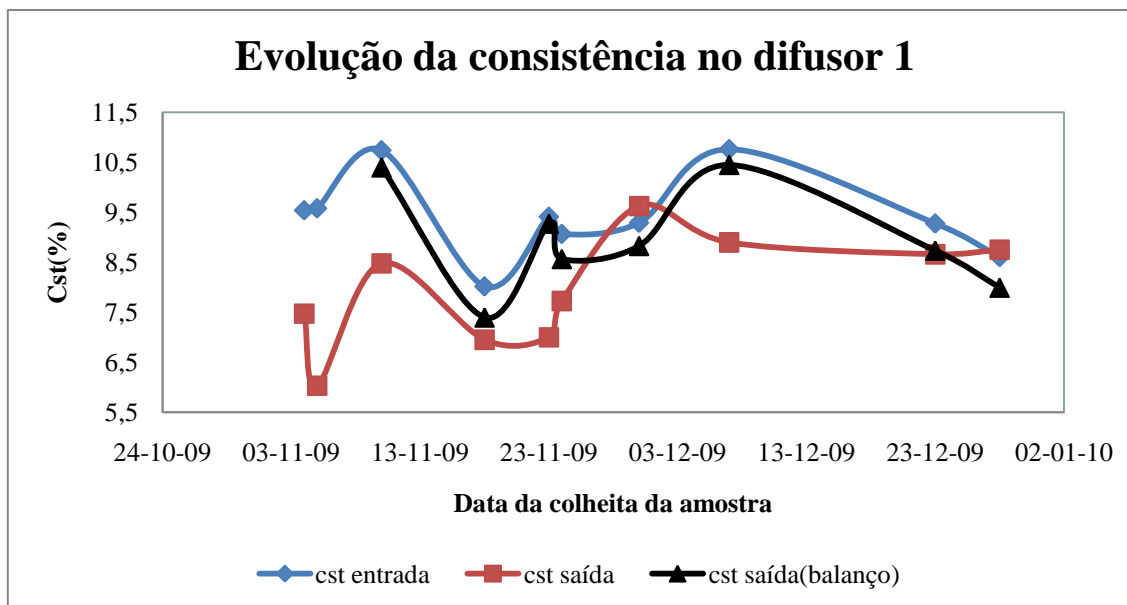


Gráfico 6- Evolução da consistência da pasta da alimentação e da descarga do difusor 1, assim com a consistência calculada a partir do balanço (à saída).

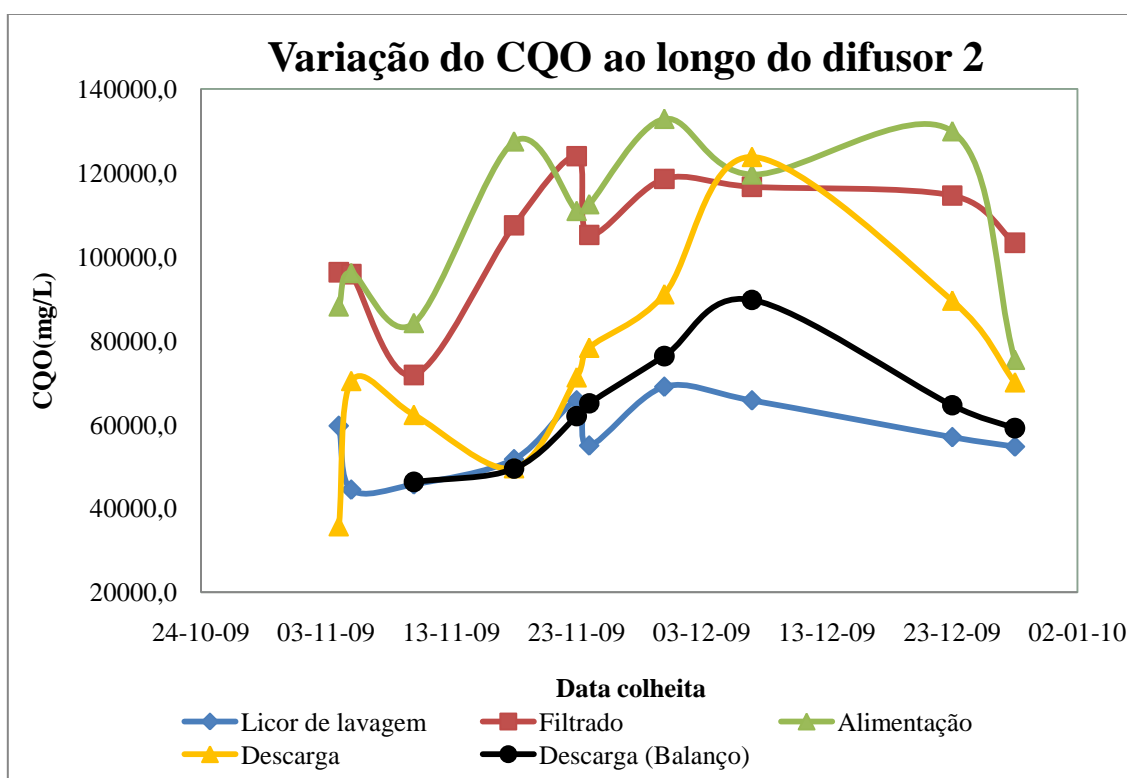


Gráfico 7- Representação da evolução do CQO (mg/L) ao longo do Difusor 2, tendo em conta a colheita de amostras que foi realizada.

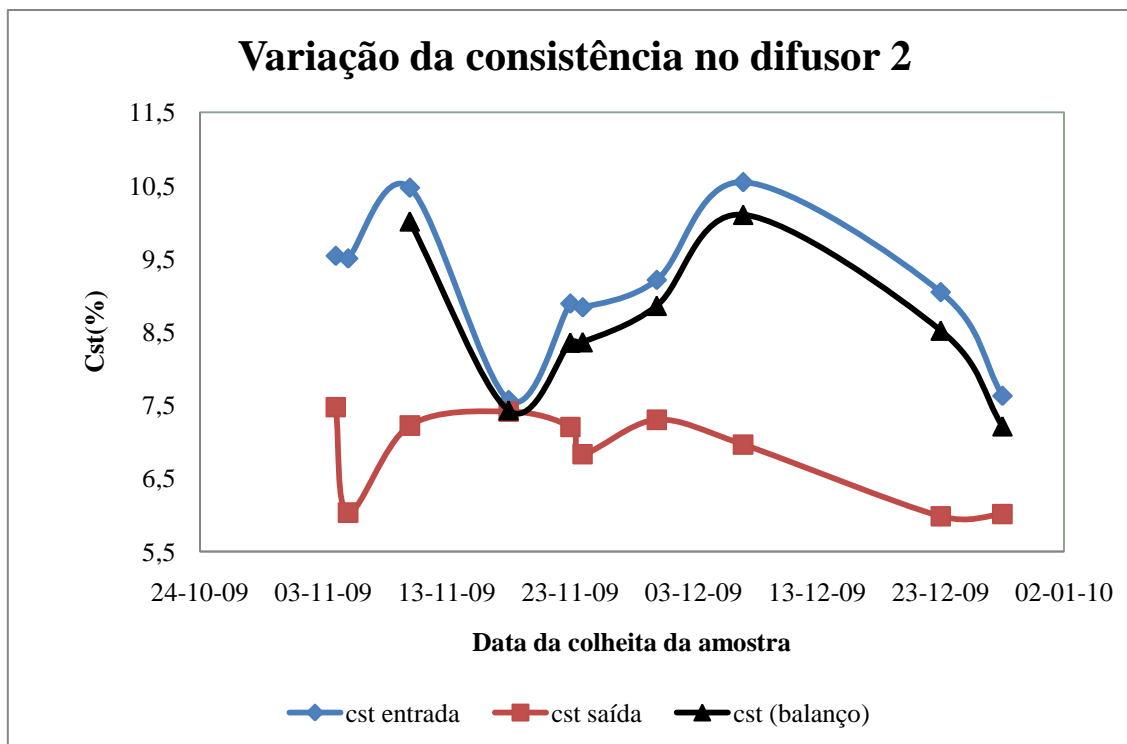


Gráfico 8- Evolução da consistência da pasta da alimentação e da descarga do difusor 2, assim com a consistência calculada a partir do balanço (à saída).

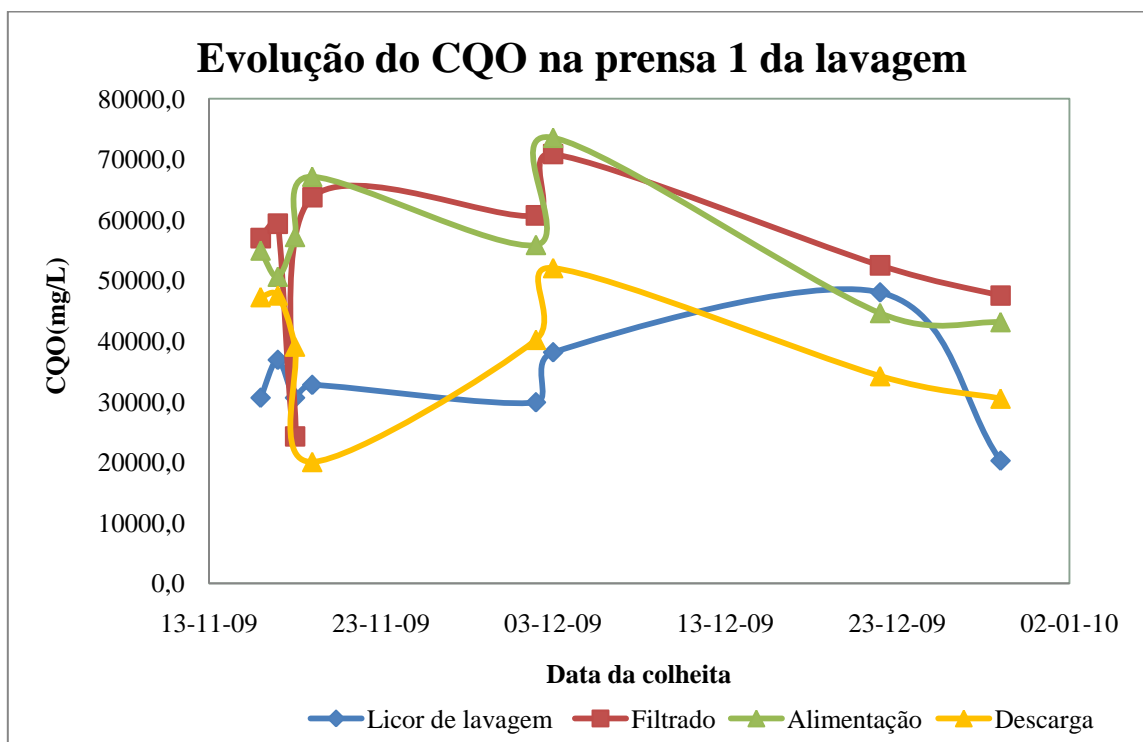


Gráfico 9- Representação da evolução do CQO (mg/L) ao longo da 1ª prensa da lavagem, tendo em conta a colheita de amostras que foi realizada.

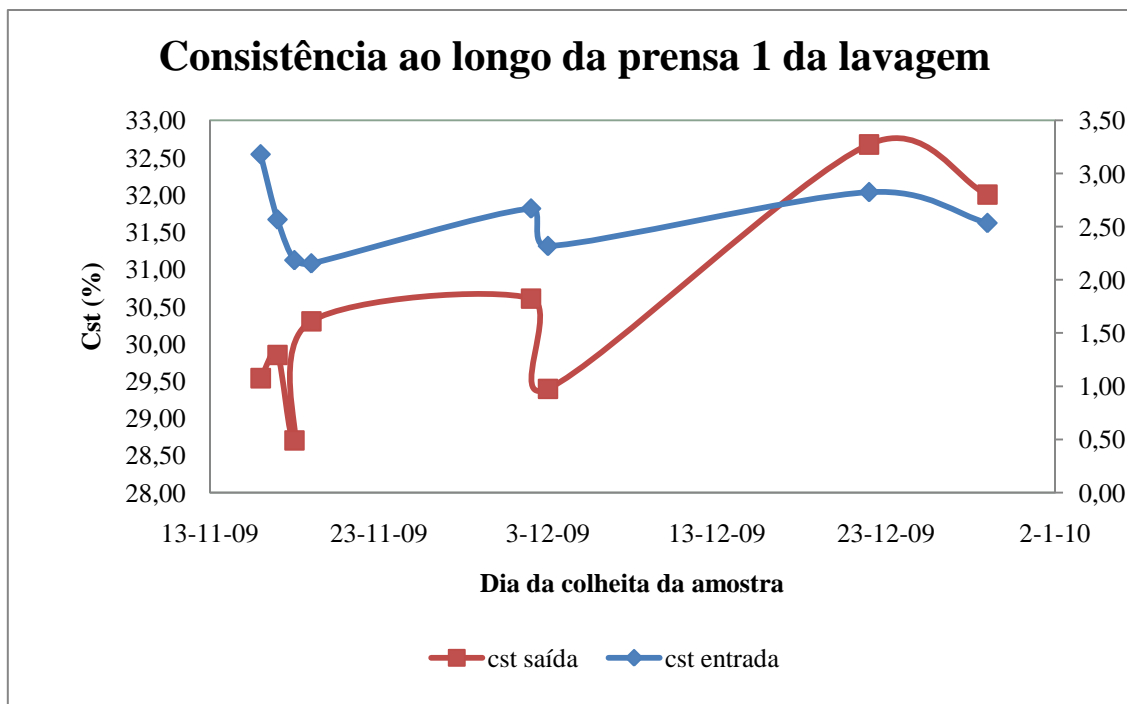


Gráfico 10- Evolução da consistência da pasta da alimentação e da descarga da prensa 1 da linha da lavagem.

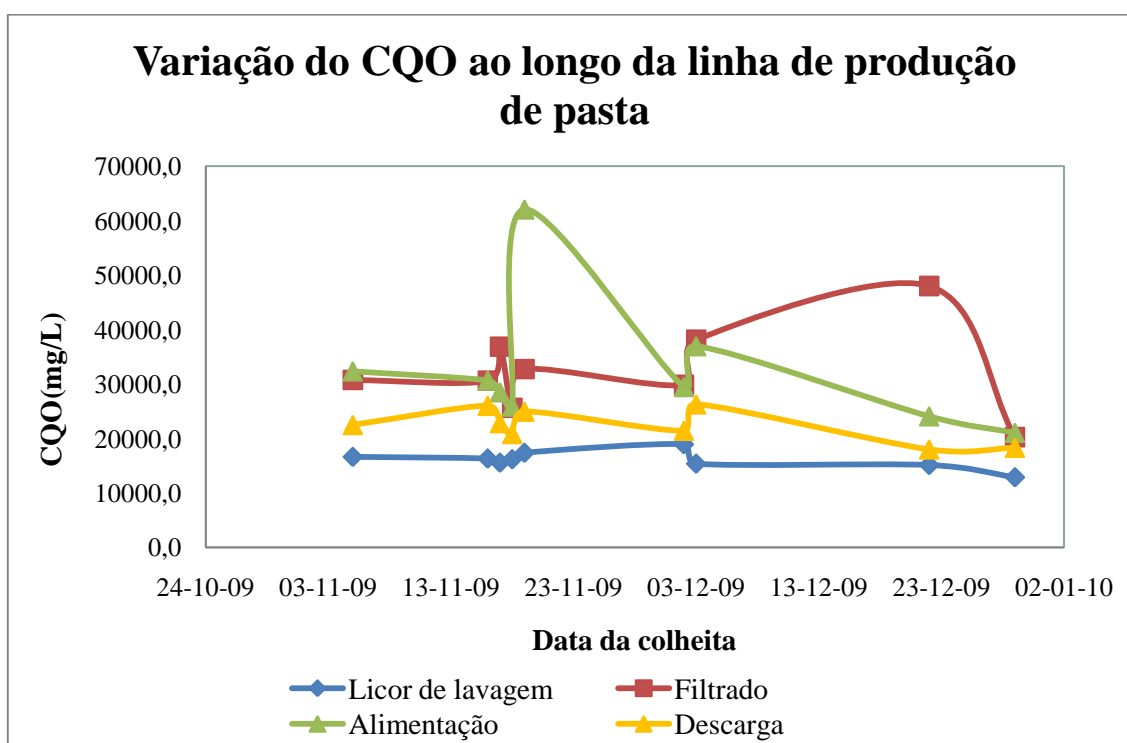


Gráfico 11- Representação da evolução do CQO (mg/L) ao longo da prensa 2 da linha da lavagem, tendo em conta as amostras colhidas.

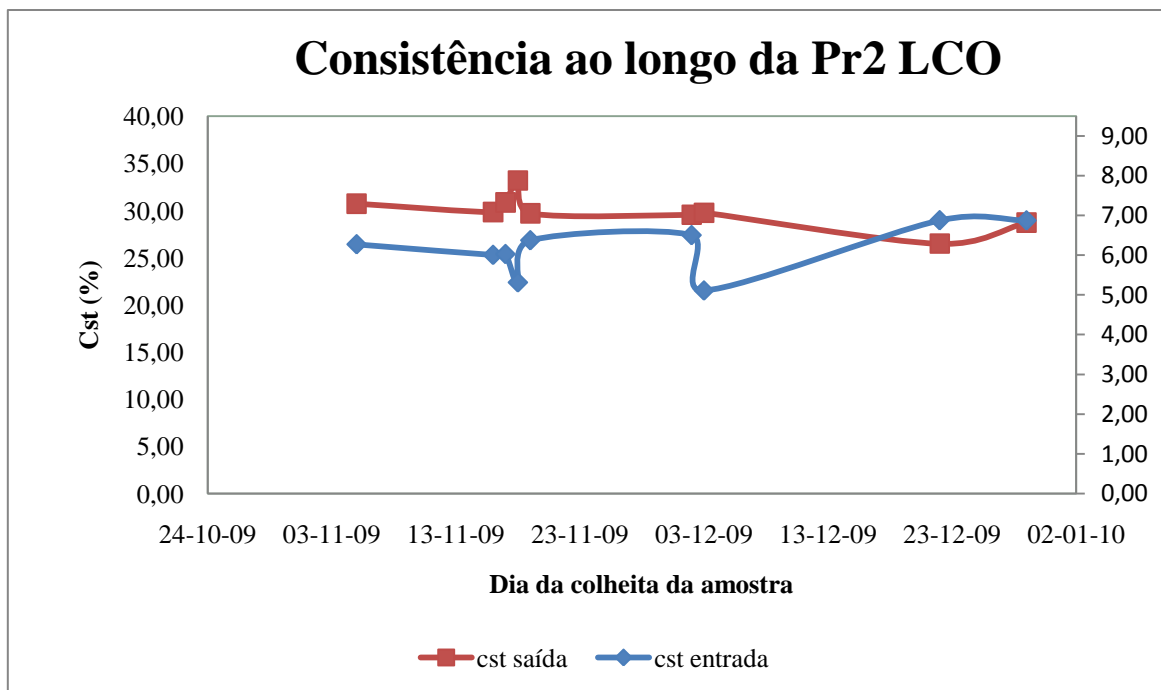


Gráfico 12- Evolução da consistência da pasta da alimentação e da descarga da prensa 2 da linha da lavagem.

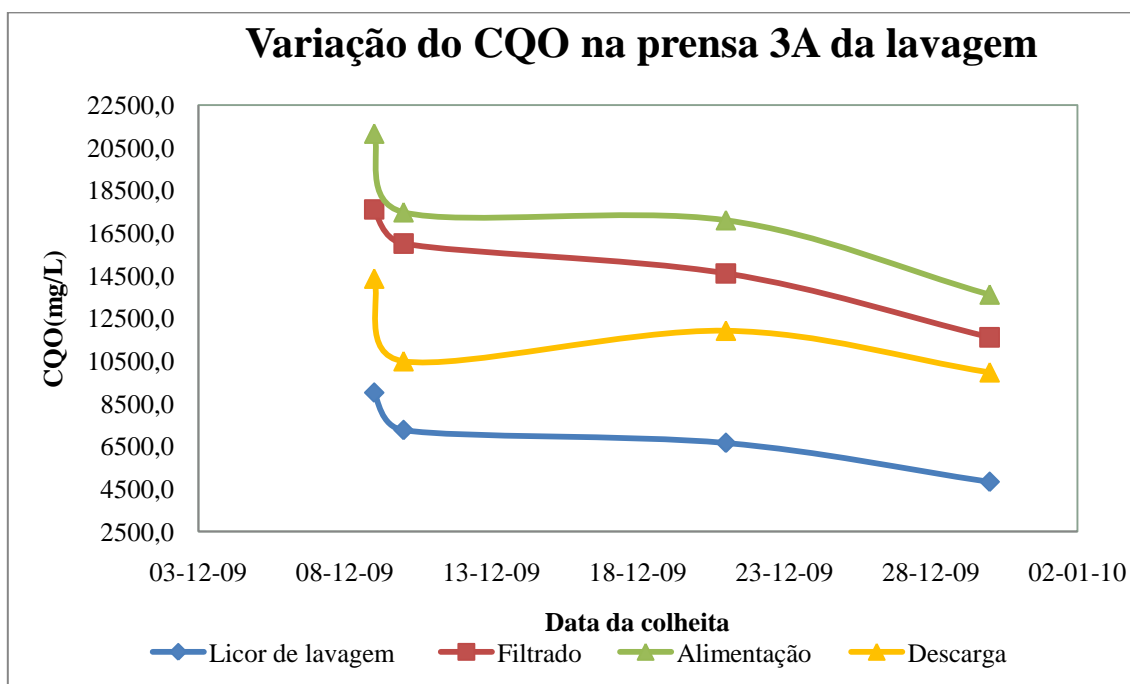


Gráfico 13- Representação da evolução do CQO (mg/L) ao longo da prensa 3A da linha da lavagem, tendo em conta as amostras colhidas.

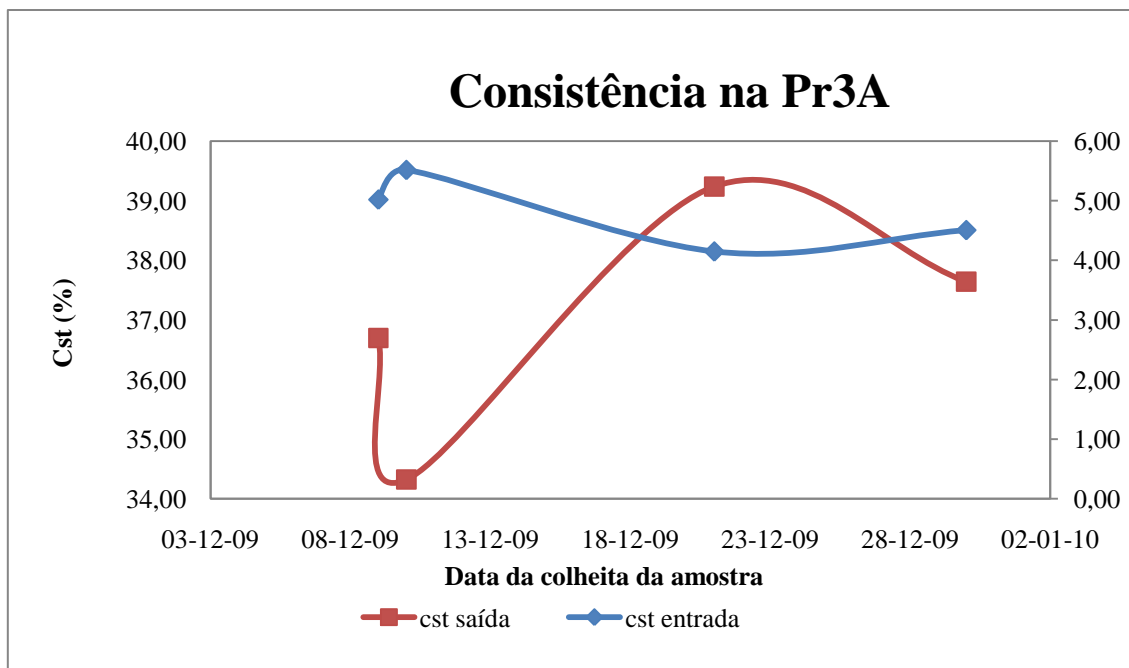


Gráfico 14- Evolução da consistência da pasta da alimentação e da descarga da prensa 3A da linha da lavagem .

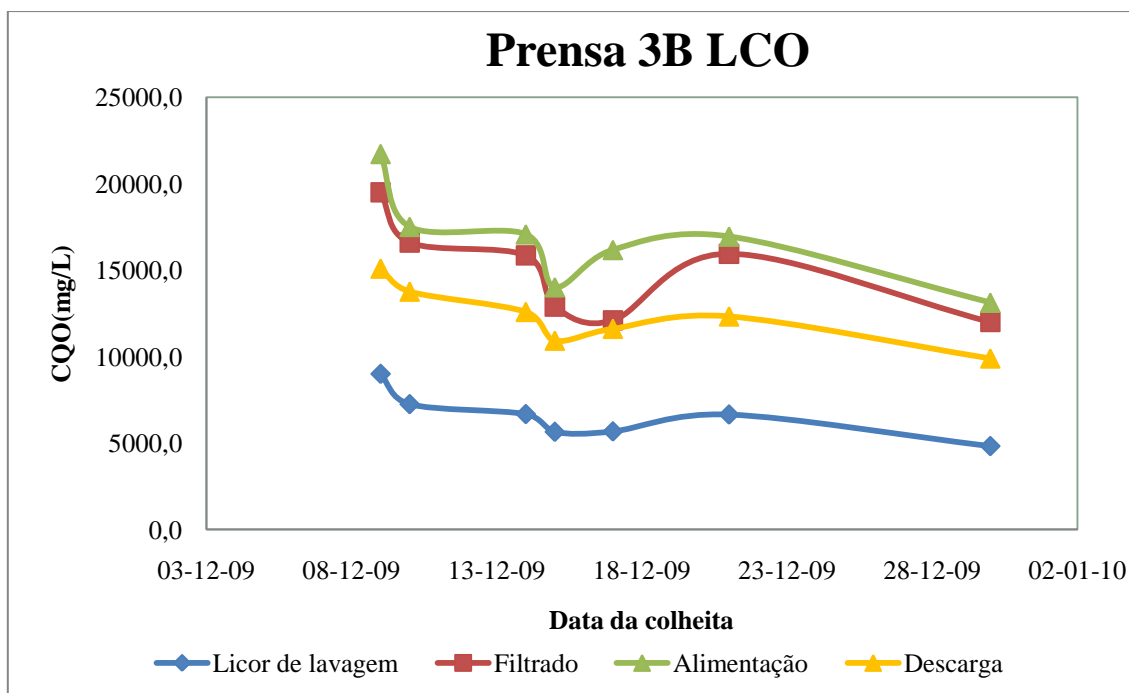


Gráfico 15- Representação da evolução do CQO (mg/L) ao longo da prensa 3B da linha da lavagem, tendo em conta as amostras colhidas.

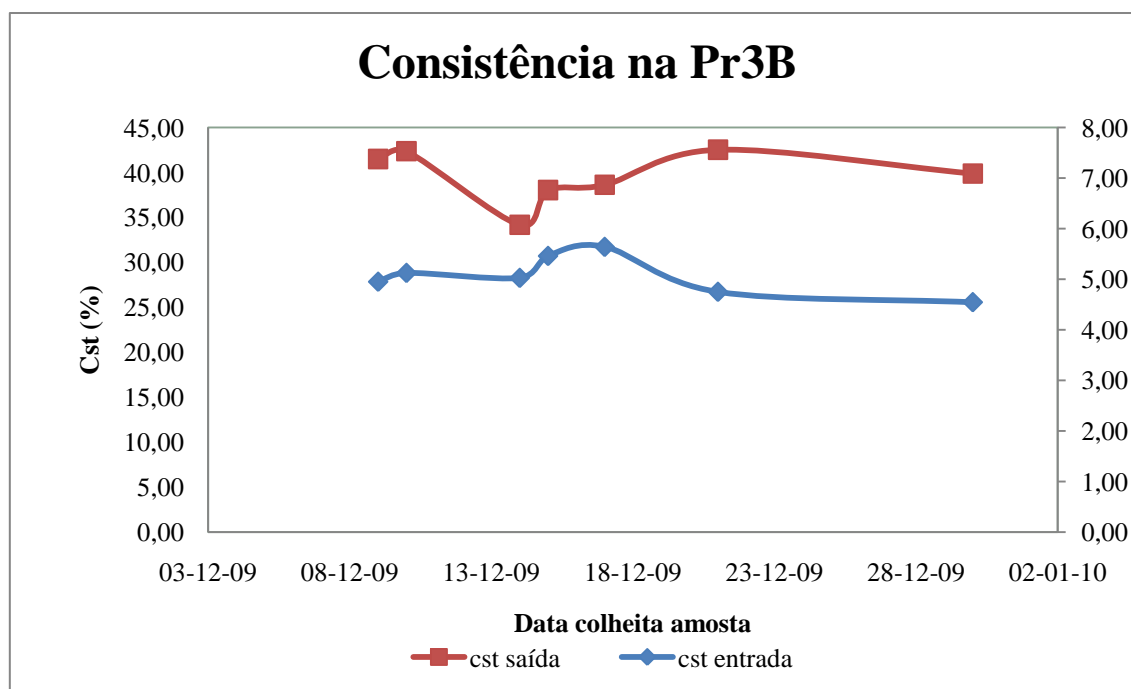


Gráfico 16- Evolução da consistência da pasta da alimentação e da descarga da prensa 3B da linha da lavagem.

A partir da análise de resultados apresentados para os difusores pode-se verificar que a pasta sai mais limpa em situações em que a consistência da pasta à saída deste equipamento é mais elevada. Quanto ao factor de diluição, as pastas descarregadas apresentam menores valores de CQO à medida que o factor de diluição utilizado é mais elevado. O licor de lavagem introduzido deve ser tão limpo quanto possível, uma vez que o menor CQO associado a esta corrente também contribui de forma positiva para uma melhor extracção (saída de pasta mais limpa).

O aumento da consistência à saída leva a uma diminuição no CQO na pasta de descarga; associando um factor de diluição com um valor próximo de 2 m³/tpsa verificou-se um aumento da razão de deslocamento assim como da eficiência de remoção. A eficiência de lavagem e a eficiência de lavagem modificada são também mais elevadas, o que nos leva a dizer que é mais vantajoso trabalhar com consistências médias-altas para que o equipamento tenha uma resposta o mais eficiente possível.

Quando o factor de diluição é constante, e as consistências de entrada e saída também, verifica-se que é mais favorável operar para produções mais altas, uma vez que assim se consegue obter pastas mais limpas.

O licor de lavagem, que circula em contracorrente, deve ser o mais limpo possível sempre que está a ser introduzido em mais uma etapa, uma vez que a quantidade de sólidos que está no licor que ajuda na lavagem tem influência na qualidade da lavagem que é feita á pasta, que é um factor importante para a etapa do branqueamento.

Após análise das amostras e com o objectivo de caracterizar os vários equipamentos de lavagem foram obtidos por cálculo os valores dos vários parâmetros apresentados em anexo. Os valores de razão de deslocamento alcançados rondam em média os 90% enquanto a eficiência de remoção de CQO tende para valores de 40%. Para a eficiência modificada o difusor 1 operou num máximo de 48% enquanto o difusor 2 operou para valores de 20%.

Na prensa 1 da linha da lavagem, para que a pasta na descarga apresente menos CQO é vantajoso trabalhar com consistências elevadas à saída, ter um FD elevado na prensa e o licor de lavagem introduzido não estar muito sujo, a semelhança da evolução nos difusores. À semelhança do que se verificou nos difusores, a eficiência de remoção é mais elevada, assim como a eficiência da prensa na situação em que o equipamento de lavagem consegue operar e extrair a pasta com menor CQO.

Comparando agora uma etapa em que a prensa opera com um factor de diluição negativo e com um licor de lavagem mais limpo com outra operação onde a prensa opera com um factor de diluição positivo e o licor de lavagem introduzido é ligeiramente mais sujo, as pastas obtidas nestas duas situações são distintas, sendo que a prensa consegue lavar mais a pasta quando opera com um FD positivo apesar do licor de lavagem estar mais sujo. Existe uma compensação feita com o factor de diluição que é benéfica para o funcionamento da prensa e para a quantidade de CQO que ainda está presente na pasta.

Um aumento da consistência de entrada da pasta vai aumentar a produção da prensa, diminuindo o factor de diluição a que a prensa opera. O valor do CQO da pasta para uma pasta mais consistente é menor, logo o licor de lavagem necessário é menor, sendo menor o filtrado extraído, havendo benefício na razão de

deslocamento, uma vez que a pasta à entrada já é mais limpa. Uma consistência mais elevada vai ter um efeito positivo na eficiência de Norden, assim como no E_{10} .

Por seu lado se houver um aumento de consistência na saída da prensa há um aumento do factor de diluição e em termos de razão de deslocamento e remoção de CQO existem ganhos nos parâmetros de caracterização da prensa, inclusive ao nível da eficiência da prensa. Um aumento de consistência vai fazer com que o nível de CQO seja menor à saída da prensa, o que é benéfico para que a qualidade da lavagem alcançada seja maior, estando a pasta mais limpa na descarga.

Ao aumentar a produção, sem que haja alteração da consistência, alimentando mais caudal apenas, o factor de diluição diminui e a eficiência da prensa aumenta, no entanto, não existem ganhos quanto a limpeza da pasta à saída, dado que o RD e ER não são alterados.

Quanto mais limpa a pasta entrar no equipamento de lavagem mais baixo pode ser o factor de diluição e mais alta poderá ser a produção.

Esta prensa tipicamente trabalha com produções altas e para valores de consistência típicos de média consistência à entrada de 3% e na descarga de 30%.

Uma combinação de condições de operação com uma consistência média de entrada, alta na descarga e produção elevada, e um factor de diluição alto são condições óptimas para que a prensa trabalhe de forma eficiente.

Na segunda prensa a pasta alimentada já é bastante mais limpa, tendo um valor de CQO mais baixo (em média 400 KgO_2/tpsa) e o licor de lavagem que está a ser introduzido neste andar é também mais limpo, uma vez que o circuito de licor e de pasta estão dispostos em contracorrente.

Esta prensa trabalha de forma mais eficiente quando opera com caudais elevados e quando a pasta que lhe é alimentada tem uma consistência à volta dos 6%. Uma consistência à entrada mais alta faz com a produção seja maior e o factor de diluição necessário seja menor o que possibilita que a pasta à saída seja mais limpa. Esta diminuição do factor de diluição pode ser causada pelo aumento da consistência na descarga de pasta ou pela diminuição do caudal de pasta alimentado à prensa (produção).

A nível da caracterização das prensas 1 e 2, estas ainda apresentam alguma oscilação que é notória nos valores obtidos, apesar de estes serem calculados a

partir da análise de amostras colhidas de forma independente umas das outras, o que tem associado alguma variabilidade nas condições operatórias.

Nas prensas 3A e 3B a variação dos parâmetros é semelhante às prensas anteriores. Um aumento de consistência na pasta alimentada e/ou um aumento de caudal provoca um aumento de produção da prensa o que faz com que o factor de diluição sofra uma diminuição. A razão de deslocamento e eficiência de remoção apenas são afectados pelas consistências e pela produção, directamente relacionados com o FD, uma vez que os parâmetros referidos são definidos em função do quantidade de substâncias ainda presentes na corrente de licor que está a circular e no licor que este embebido na pasta.

Estas prensas funcionam em paralelo e a pasta entra em média com um CQO de 280 KgO₂/tpsa enquanto na descarga a pasta tem valores de 16 KgO₂/tpsa.

Os valores para a razão de deslocamento e da eficiência de remoção encontram-se caracterizados e rondam os 50% e 94%, respectivamente, para a prensa 3A. Para a prensa 3B a razão de deslocamento tem valores à volta dos 40% enquanto a eficiência de remoção tem valores perto dos 94%. À semelhança da maior razão de deslocamento, a eficiência na prensa 3A tende a ser ligeiramente mais elevada.

Ao longo da linha da lavagem, a variação da razão de deslocamento não é muito significativa, estando os valores mais elevados associados aos difusores. Por outro lado, a eficiência de remoção de CQO apresenta valores mais elevados quando a pasta sofre acção das prensas.

A eficiência de Norden, E₁₀, tem os valores mais elevados para as prensas 3A e 3B, prensas estas que funcionando em paralelo apresentam capacidade semelhante em termos de produção, quando comparadas com as prensas 1 e 2. Dado que estas prensas são mais antigas na instalação, há já um maior conhecimento do equipamento, havendo também associado um funcionamento mais estável o que permite uma eficiência maior associada.

3.2. ENSAIO COM VARIAÇÃO NO SET-POINT DO FACTOR DE DILUIÇÃO

Após a análise das amostras colhidas foi feita uma representação gráfica dos CQO na descarga, para posterior comparação com o mesmo parâmetro quando a linha de produção de pasta ainda operava com um *set-point* mais baixo (1,5 m3/tpsa).

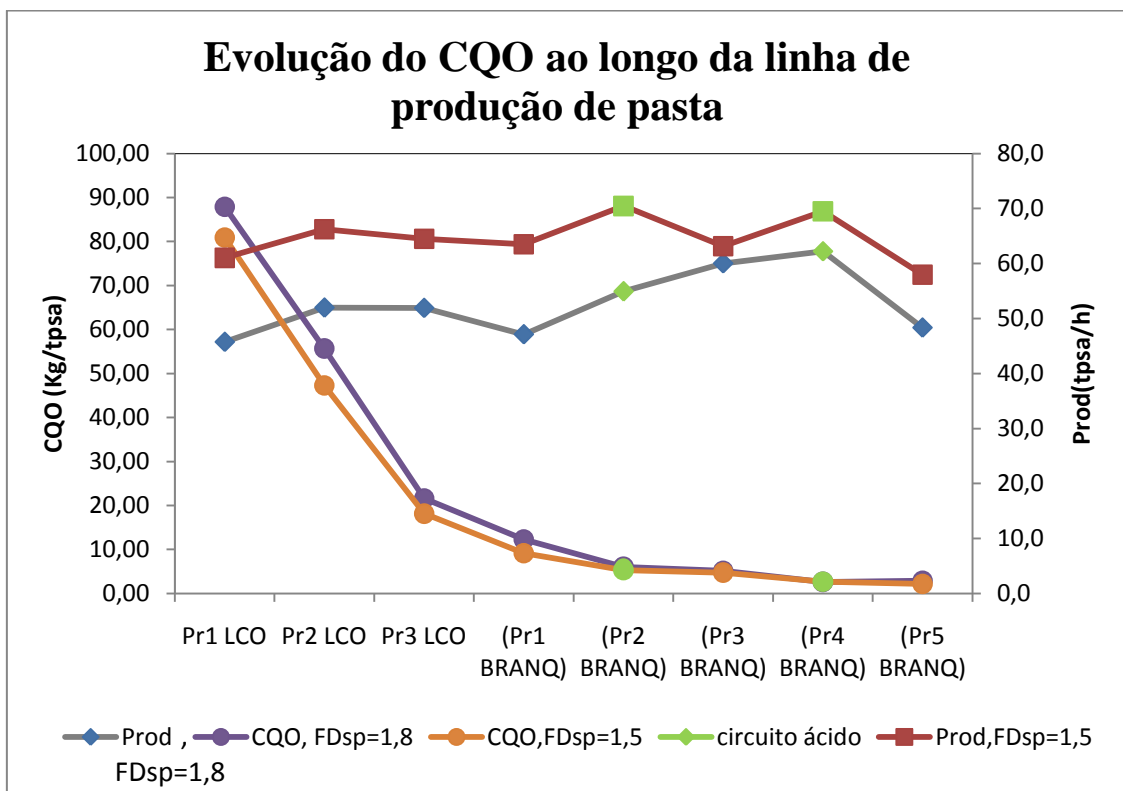


Gráfico 17- Evolução do CQO ao longo da linha de produção de pasta para factor de diluição de 1,5 m3/tpsa e comparação com os resultados obtidos aquando da produção com o valor do set-point do factor de diluição de 1,8 m3/tpsa .

Ao analisar as curvas obtidas verifica-se que a curva com um factor de diluição mais elevado se encontra deslocada, para cima, em relação à curva criada pela curva feita quando o *set-point* tinha um valor mais baixo. Isto pode ser devido ao ponto de partida, quando feitas as análises das amostras, comprovada pelo número *kappa*. Ao comparar os valores deste, tendo em conta a data da realização deste ensaio, o número *kappa* era mais elevado à saída do digestor, o que indica maior quantidade de lenhina presente na pasta. Este facto pode explicar o deslocamento da curva verificado.

Apesar da maior quantidade de lenhina no início da linha lavagem, no final da sequência do branqueamento a pasta tem o mesmo valor de CQO à saída, apresentando características semelhantes, indicando a vantagem de operar com valores mais altos no factor de diluição. Com um valor mais elevado do factor de diluição o sistema tem uma maior capacidade de resposta e o caudal de lavagem que está envolvido na substituição do licor presente na pasta é maior, considerando que não existem grandes oscilações na produção da prensa.

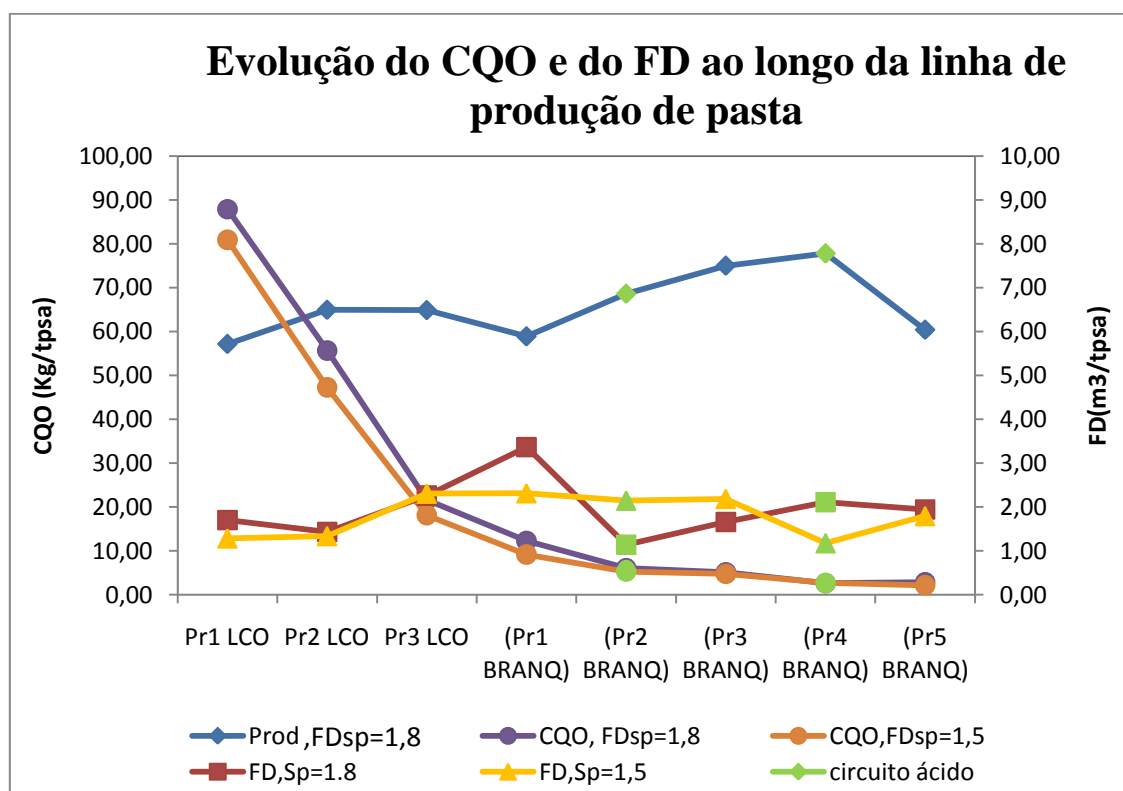


Gráfico 18- Evolução do CQO ao longo da linha de produção de pasta, e comparação de resultados de operação com diferentes factores de diluição.

Tendo em conta a representação gráfica anterior onde está novamente a linha que nos dá a evolução do CQO da pasta na descarga desde a entrada na linha da lavagem até à saída da linha do branqueamento, é possível também observar a evolução do factor de diluição em cada prensa, tanto para o circuito ácido (prensas 2 e 4 do branqueamento) como para o circuito alcalino (restantes prensas da linha de produção).

Ao considerar o circuito alcalino e tendo em conta o valor do factor de diluição introduzido na última prensa do branqueamento, primeira prensa

considerando o circuito de filtrado, na prensa seguinte o valor do FD com que esta opera não deveria ter grande variação. Analisando a linha do factor de diluição e tendo em conta os valores da prensa 5 e 3 do branqueamento verifica-se que há uma diminuição do FD, no entanto, na linha da produção, nesse intervalo houve um aumento. Dada a produção mais alta a que prensa 3 estava a trabalhar e tendo em conta a definição de factor de diluição (relação inversa com produção), esta diminuição no factor de diluição pode justificar-se pela operação desta prensa com valor de produção mais elevado. Na zona da lavagem acontece também uma queda no valor do factor de diluição, quando comparando as prensas 3 com as prensas 2 e 1 respectivamente. Neste sentido foi feita uma nova colheita na linha da lavagem com objectivo de perceber se foi um efeito de instabilidade do processo temporária ou se a variação que se encontrava nesta zona se continuava a verificar-se. (*Gráfico 19*)

Analisando então o gráfico com os resultados desta nova colheita de amostras realizada é possível constatar a tendência de valores mais baixos associados às duas primeiras prensas da lavagem, tendo em conta que estas tem uma maior capacidade de produção associada. Tendo em conta as variáveis que entram no calculo do factor, entre eles, o caudal de licor de lavagem e a produção, verifica-se que o caudal de lavagem que é utilizado tanto nas prensas 1 e 2 da tem uma perda de 30 m³/h (aproximadamente). Uma vez que a fábrica trabalha em circuito fechado não seria expectável esta perda, e estando eliminada a hipótese de este caudal estar a ser enviado por by-pass, será admissível uma má medição por parte de algum medidor de caudal, o que depois também terá influência em toda a parte matemática associada. Este factor poderá ajudar a explicar a ajudar esta redução que se verifica na linha da lavagem. A contribuir para esse facto também se verifica que a linha representativa das produções tem algumas oscilações, o que denota que os valores destas três prensas ainda não estão em perfeito ajuste, sendo que a prensa 3 não tem capacidade para atingir valores de produção tão elevados quando comparado com as prensas 1 e 2, dadas as dimensões das prensas em questão.

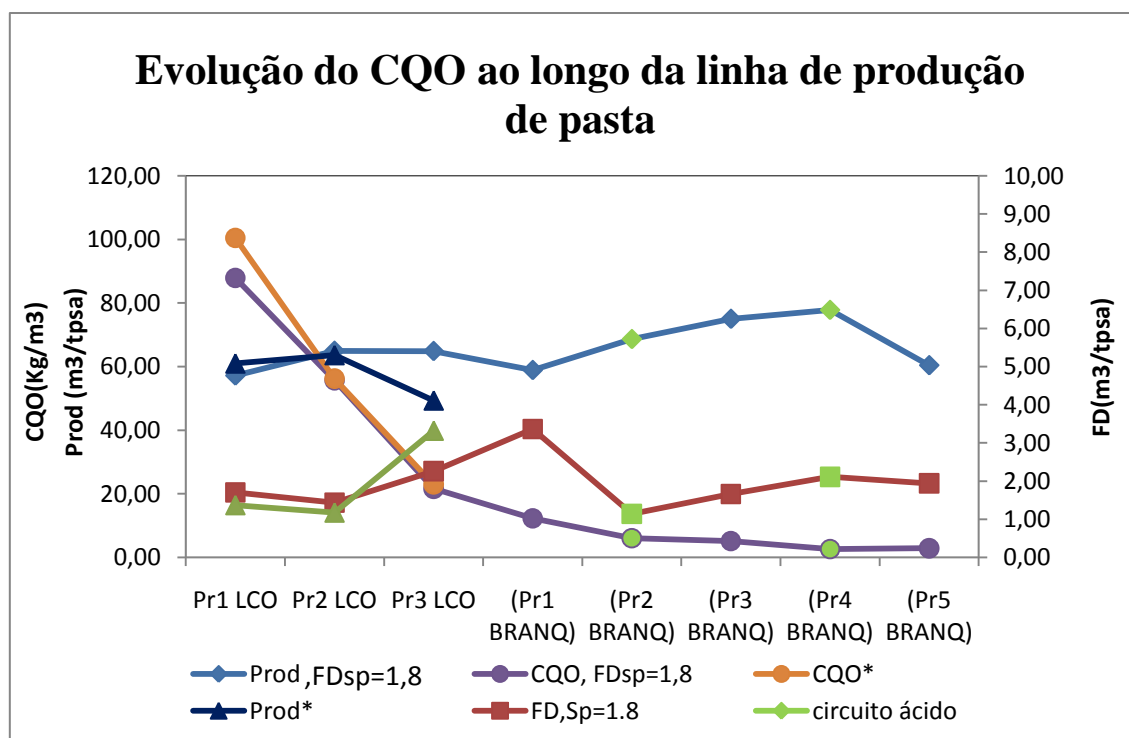


Gráfico 19- Evolução do CQO ao longo da linha de produção de pasta, com destaque para ensaio realizado para a linha da lavagem (*).

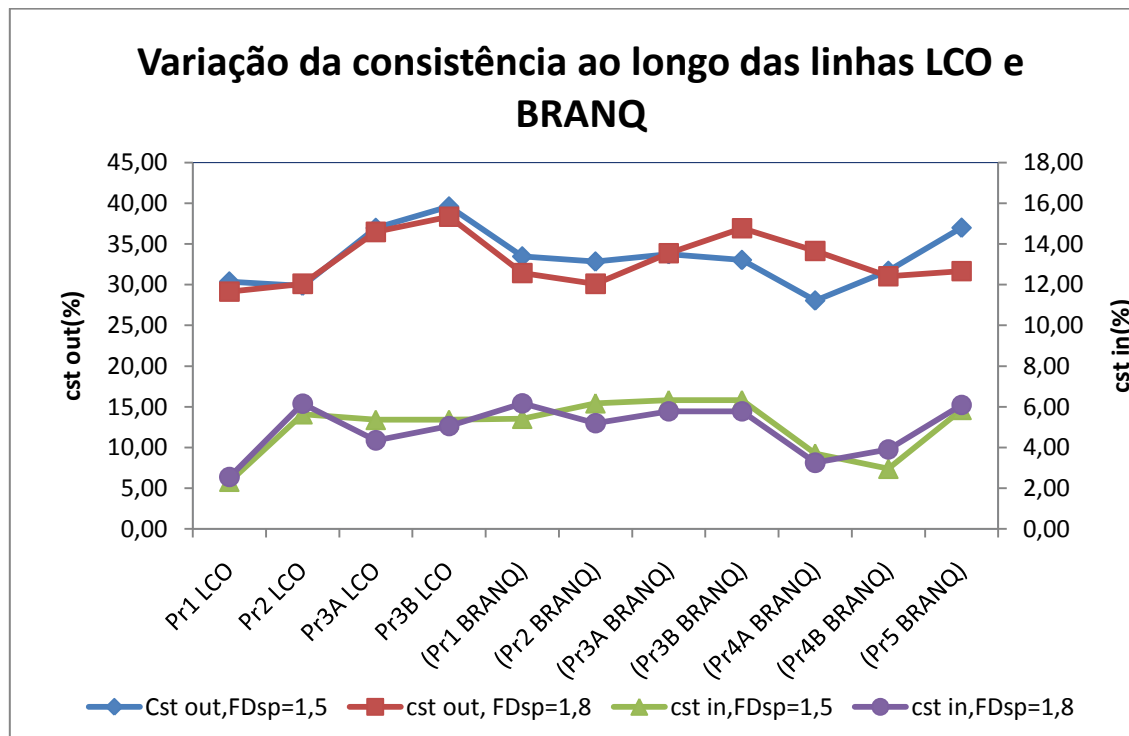


Gráfico 20- Evolução das consistências, da entrada e da saída, ao longo da linha de produção de pasta, para dois valores diferentes de set-point no factor de diluição.

Ao analisar a consistência da alimentação ao longo da linha de produção de pasta verifica-se que a primeira prensa da linha tem um valor aparentemente baixo quando comparado com os restantes. No entanto tendo em conta que esta prensa se encontra logo de seguida à zona da crivagem, um valor próximo de 3% é considerado bom. As prensas 4 também não são alimentadas com consistências tão elevadas. Estas prensas tem um modo de operação diferente, dado que não lhe é introduzido licor de lavagem, dada a sua função principal de prensagem, tendo assim necessidade de alimentação de pastas menos consistentes para evitar a colmatação da prensa e tendo em conta a capacidade de produção da mesma.

Olhando agora para as consistências de saída, verifica-se que a prensa 1 da lavagem não tem uma capacidade de prensagem tão elevada como as restantes prensas, no entanto, estes valores já são aceitáveis dado que esta prensa se encontra logo após a crivagem. Já a prensa seguinte, prensa 2 LCO, deveria ter valores de consistência na saída mais elevados. Este facto pode estar relacionado com os valores de pressão que opera na prensa, uma vez que esses valores influenciam a prensagem conseguida à saída da prensa, o que influencia directamente a variável em análise, uma vez que uma maior prensagem vai dar na saída uma consistência mais elevada.

Analisando os *gráfico 21 e 22* onde está representada a evolução da eficiência de remoção e do E_{10} verifica-se que nem todas as prensas se encontram a funcionar em condições óptimas. Existem dois mínimos correspondentes às prensas 2 da lavagem e do branqueamento respectivamente, indicando funcionamento longe das condições óptimas. As restantes prensas trabalham com eficiências que rondam os 90%, sendo que algumas até ultrapassam este valor.

A ER para a prensa 2 da lavagem apresenta um mínimo na curva, que pode estar relacionado com o facto de esta prensa apresentar problemas de incrustações, havendo necessidade de paragem diária da prensa para lavagem da mesma com água de alta pressão. O mau funcionamento desta prensa reflecte-se no mínimo dos valores obtidos para os parâmetros obtidos que permitem a caracterização da prensa, ou seja, eficiência de remoção e E_{10} .

À semelhança da eficiência de remoção também para a eficiência de Norden standard (E_{10}) verifica-se que a evolução desta ainda tem algumas oscilações,

associadas aos próprios parâmetros com que é calculado, assim como ao funcionamento dos equipamentos onde isso ainda está a acontecer na instalação.

Na prensa 2 do branqueamento existem também problemas de operação, dada a ocorrência de colmatação nesta prensa. De salientar, na prensa 2 do branqueamento como já referenciado; na prensa 1 desta mesma linha também não são conseguidos valores muito elevados o que se pode dever a desvios no factor de diluição ou na produção. No entanto, esta é uma análise de valores calculados para o intervalo de tempo em que se considera que foi recolhido a amostra, podendo estes valores serem considerados instantâneos.

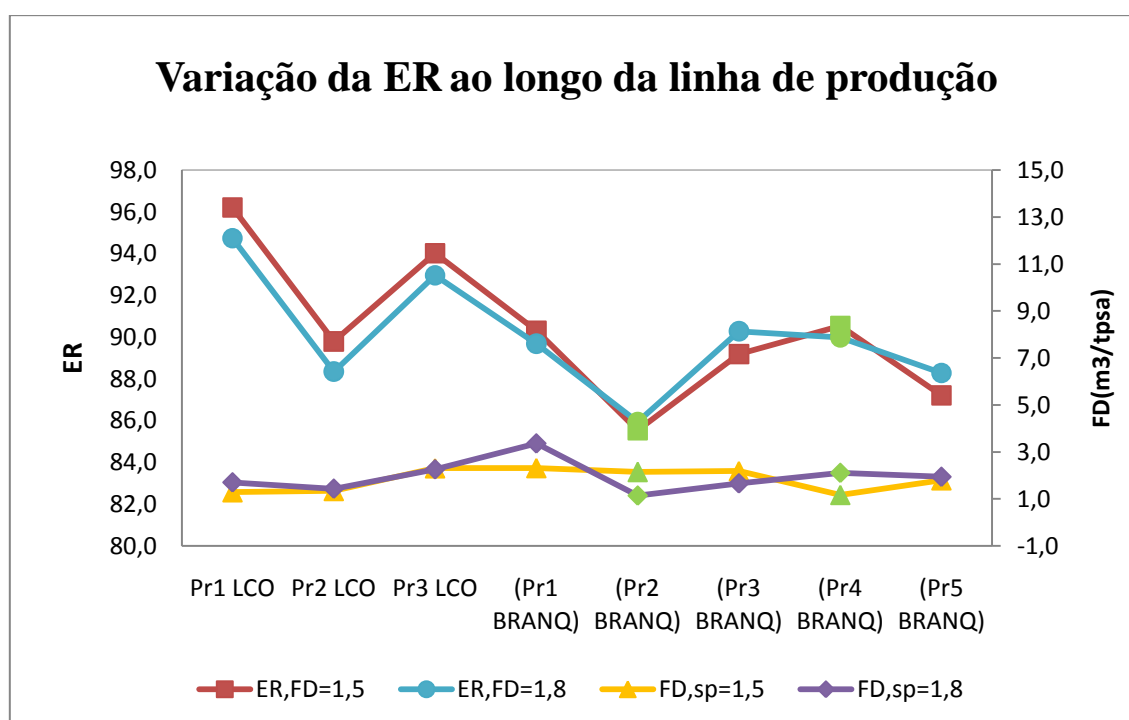


Gráfico 21- Evolução da eficiência de remoção ao longo da linha de produção de pasta, para dois valores diferentes de set-point no factor de diluição.

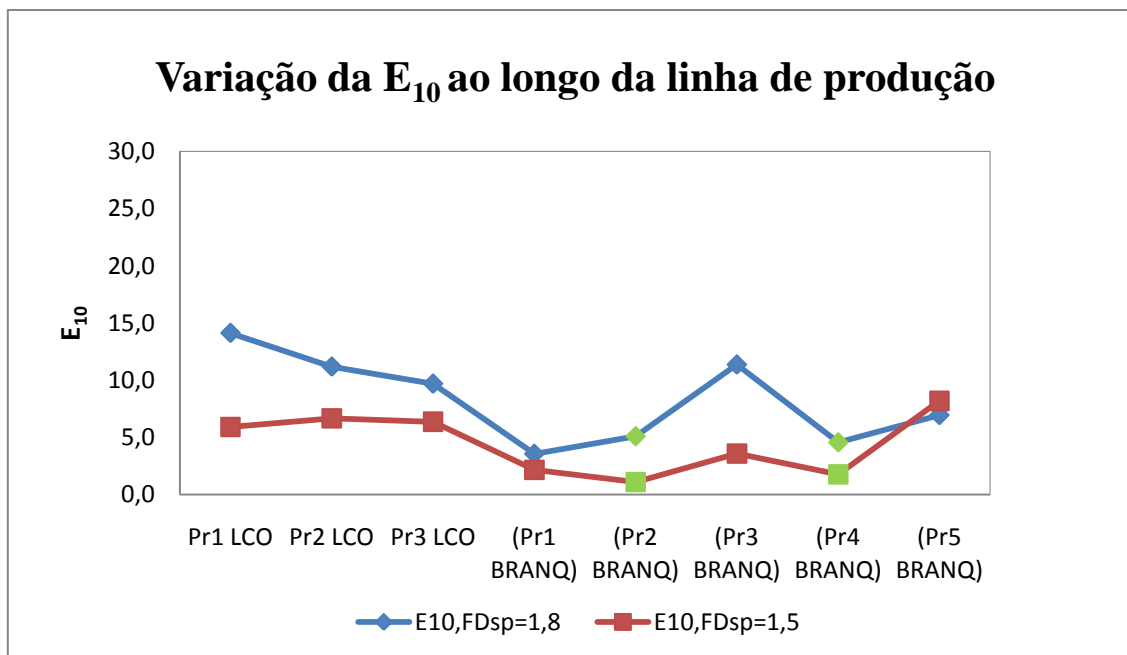


Gráfico 22- Evolução da E_{10} ao longo da linha de produção de pasta, para dois valores diferentes de set-point no factor de diluição.

4. CONCLUSÕES

Tendo em conta a caracterização realizada na unidade fabril, a partir da análise de CQO e consistências das amostras recolhidas foi possível calcular as eficiências de lavagem de cada uma das prensas. Verificou-se que estas se encontravam a operar dentro dos valores recomendados, no entanto, devido a mau funcionamento da prensa 2 da lavagem, a eficiência desta é menor, uma vez que esta tende a formar incrustações. Outro dos parâmetros que permitiu ver a influência de cada uma das prensas sobre a pasta foi a eficiência de remoção, e tendo em conta este parâmetro as prensas 2 da lavagem e do branqueamento são as que estão a remover menos CQO desde a entrada e a saída. Quanto à prensa localizada na linha da lavagem, pode dever-se à formação de incrustações, o que leva à necessidade de lavagem diária e com água de alta pressão, para evitar entupimento das perfurações por onde depois passa o licor de lavagem ao longo do processo.

O ensaio realizado com o factor de diluição permitiu verificar que quando se opera com valores mais elevados no set-point é possível obter pastas mais limpas. Tendo em conta os resultados obtidos verificou-se que partindo de uma pasta mais suja se obtém uma pasta final com as mesmas características, sendo para isso necessário operar com um valor mais elevado no factor de diluição, o que favorece a maior substituição de licor existente na pasta.

Após a alteração de alguns dos factores correctivos existentes nas fórmulas implementadas no cálculo do factor de diluição, tendo em conta um melhor controlo dos níveis dos tanques de filtrado de modo a evitar os transbordos nos tanques de filtrados, verificou-se um melhor controlo do nível dos tanques de filtrado sempre que a prensa anterior, analisando a partir do movimento do filtrado, operava com um valor mais elevado. Dado o sistema de controlo implementado, para tentar compensar alguma alteração em relação ao set-point definido tanto para o factor de diluição como para o nível do tanque, o sistema tende a responder com um abaixamento do factor de diluição sempre que o nível do tanque é menor do que o previsto, havendo assim menos filtrado retirado para a prensa seguinte de modo a estabilizar o nível pretendido. Essa diminuição vai ter consequências também nas prensas seguintes do circuito, uma vez que a prensa

seguinte, terá um licor de lavagem menor a ser-lhe introduzido, a menos que exista alguma compensação por by-pass, havendo também menor caudal de filtrado produzido e assim sucessivamente ao longo do circuito, até que o circuito restabeleça a alteração. Esta resposta é dada pelo próprio modelo de controlo, não sendo necessária intervenção do operador, a não ser que o sistema por algum motivo tenha alguma anomalia que o sistema por si não consiga dar resposta.

A pasta circula na prensa em sentido inverso ao filtrado, havendo um circuito em contra corrente que proporciona maior eficiência no processo, uma vez que o filtrado mais limpo é utilizado como licor de lavagem nos andares onde a pasta está também mais limpa. Isto só se torna possível quando circuito da pasta e de filtrado se encontram a circular em sentidos opostos. De outro modo seria necessário introduzir maiores quantidades de água limpa, para conseguir as mesmas características finais do produto com as mesmas condições de operação.

Quanto à capacidade de prensagem das prensas verifica-se que os valores obtidos de consistências na descarga estão entre os valores esperados (32-35%) tendo em conta as prensas utilizadas. Estes valores não são conseguidos em particular na prensa 2 do branqueamento, que como já foi referenciado esta prensa tem problemas de funcionamento, dada a formação de colmatção ao longo do processo de produção.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Gullichsen, J.; Pikka, O; Vesala, R.; Carlsson, J.G.; Steffes, F.; Chemical Pulping, Papermaking Science and Technology, Book 6A; Gullichsen, J., FogelHolm C.J; Tappi Press.
2. Gullichsen, J.; Fogelholm, J (2000); Chemical Pulping, Papermaking Science and Technology, Book 6B, Tappi Press.
3. Crotogino, R. H.; Poirier, N.A. and Trinh, D.T.; The Principles of Pulp Washing, Tappi Journal 70(6); Junho 1987; p.95
4. Krottscheck, A. W.; Handbook of Pulp, V; Sixta, Herbert; Wiley-VCH; 2006.
5. D'Almeida, Maria Luiza Otero; Tecnologia de fabricação da pasta Celulósica; Celulose e Papel, Volume I; 1988.
6. Smook, G. A., Handbook for Pulp and Paper Technologists, Tappi Press, 1997, Canada.
7. Dence, Carlton W.; Reeve, Douglas W.; Pulp Bleaching- Principles and Practice; Tappi Press, 1996, Atlanta, Georgia.
8. Coulson, J.M.; Richardson, J.F; Tecnologia Química – Uma introdução ao Projecto em Tecnologia Química, Volume VI, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1989.
9. Coulson, J.M.; Richardson, J.F; Tecnologia Química – Operações Unitárias, Volume II, 2ª Edição, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
10. Sjöström, E., Wood Chemistry, Fundamentals and Applications, 2ª edição, Academic Press, San Diego, 1981

11. <http://www.celbi.pt/>, consultado a partir de Outubro de 2009.
12. <http://www.altri.pt/>, consultado a partir de Outubro de 2009.
13. <http://www.sfk.ca> - Sfk, consultado em Janeiro de 2010.
14. <http://www.britannica.com> – enciclopédia britânica online, consultado em Março 2010.
15. <http://www.aeportugal.pt> – associação empresarial de Portugal , consultado em Março 2010.
16. <http://www.portucelsoporcel.com> – grupo Portucel Soporcel , consultado em Março 2010.
17. Pinto, P.C., Evtuguin, D.V., Neto, C.P., Structure of hardwood glucuronoxylans: modifications and impact on pulp retention during wood kraft pulping, *Carbohydrate Polymers* 60 (2005) 489–497.
18. Lisboa, S.A., Evtuguin, D.V., Neto, C.P., Goodfellow, B.J., Isolation and structural characterization of polysaccharides dissolved in Eucalyptus globulus kraft black liquor, *Carbohydrate Polymers* 60 (2005) 77–85.
19. Zugenmaier, P., Conformation and packing of various crystalline cellulose fibres, *Progress in polymers science* 26 (2001) 1341-1417.
20. Rowell, R.M., Handbook of wood chemistry and wood composites, *CRC Press*; 1ª edição, 2005.
21. Davis, M., Baker J., Rignall, T. ,Himmel M., Changes in cellulose morphology of pretreated yellow poplar during enzymatic hydrolysis,

National Bioenergy Center, National Renewable Energy Laboratory, 1617
Cole Blvd, Golden, CO 80401.

6. ANEXOS

➤ Anexo A

Tabela A 1- Valores obtidos para a análise do difusor 1 tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.

		Consistência (%)				CQO (mg/L)		CQO (KgO ₂ /tpsa)	
Dia	Hora	Entrada	Saída	Pr (tpas/h)	FD (m ³ /tpsa)	Licor de lavagem	Filtrado	Alimentação	Descarga
04. 11.09	09.12	9,54	7,47	33,0	0,87	59700,0	96312,5	752,13	321,21
05. 11.09	10.58.21	9,58	6,03	27,4	0,47	44166,7	86944,4	576	564
10. 11.09	09.22.57	10,74	8,48	28,1	1,58	45750,0	69166,7	647,82	434,88
		10,74	10,40	28,1	1,75	45750,0	69166,7	647,82	343,35
18. 11.09	16.31.39	8,02	6,95	31,5	1,61	51750,0	110000,0	1327,59	754,55
		8,02	7,40	31,5	1,66	51751,0	110001,0	1327,59	708,84
23. 11.09	09.10.34	9,41	7,00	35,1	2,39	65750,0	112708,3	955,74	729,81
		9,41	9,27	35,1	2,61	65750,0	112708,3	955,74	561,81
24. 11.09	14.15.00	9,07	7,72	28,9	1,89	55000,0	107708,3	1017,07	655,79
		9,07	8,57	28,9	1,98	55000,0	107708,3	1017,07	587,61
30. 11.09	09.43.40	9,29	9,62	35,3	2,37	69000,0	115208,3	1168,72	676,87
		9,29	8,83	35,3	2,29	69000,0	115208,3	1168,72	737,95
07. 12.09	10.24.34	10,76	8,90	32,2	2,20	65750,0	96666,7	883,85	782,12
		10,76	10,45	32,2	2,33	65750,0	96666,7	883,85	665,59

		Consistência (%)				CQO (mg/L)		CQO (KgO ₂ /tpsa)	
Dia	Hora	Entrada	Saída	Pr (tpas/h)	FD (m ³ /tpsa)	Licor de lavagem	Filtrado	Alimentação	Descarga
23. 12.09	09.35.50	9,28	8,66	31,6	2,85	57000,0	112500,0	1147,46	611,84
		9,28	8,74	31,6	2,86	57000,0	112500,0	1147,46	606,48
28. 12.09	09.20.36	8,61	8,75	29,7	2,56	54750,0	101250,0	1088,30	614,27
		8,61	7,99	29,7	2,47	54750,0	101250,0	1088,30	672,53

Tabela A 2- Valores obtidos para a análise do difusor 2 tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.

		Consistência (%)				CQO (mg/L)		CQO (KgO ₂ /tpsa)	
Dia	Hora	Entrada	Saída	Pr (tpas/h)	FD (m ³ /tpsa)	Licor de lavagem	Filtrado	Alimentação	Descarga
04. 11.09	09.12	9,54	7,47	33,0	0,87	59700,0	96312,5	752,13	321,21
05. 11.09	10.58.21	9,50	6,03	27,2	1,83	44500,0	95833,3	823,48	728,58
10. 11.09	09.22.57	10,47	7,22	27,3	1,69	45750,0	71805,56	647,82	519,48
		10,47	10,01	27,3	1,94	45750,0	71805,56	647,82	374,58
18. 11.09	16.31.39	7,57	7,41	30,7	2,28	51750,0	107500,00	1400,85	556,57
		7,57	7,43	30,7	2,28	51751,0	107501,00	1400,85	555,30
23. 11.09	09.10.34	8,89	7,20	35,6	1,27	65750,0	123958,33	1023,27	712,47
		8,89	8,35	35,6	1,40	65750,0	123958,33	1023,27	611,94
24. 11.09	14.15.00	8,84	6,83	29,0	1,46	55000,0	105208,33	1044,59	785,46
		8,84	8,36	29,0	1,63	55000,0	105208,33	1044,59	641,57

		Consistência (%)				CQO (mg/L)		CQO (KgO ₂ /tpsa)	
Dia	Hora	Entrada	Saída	Pr (tpas/h)	FD (m ³ /tpsa)	Licor de lavagem	Filtrado	Alimentação	Descarga
30. 11.09	09.43.40	9,21	7,30	35,9	1,45	69000,0	118541,67	1178,65	857,70
		9,21	8,86	35,9	1,61	69001,0	118542,67	1178,65	706,76
07. 12.09	10.24.34	10,55	6,96	33,1	1,66	65750,0	116666,67	912,99	1024,37
		10,55	10,10	33,2	1,91	65751,0	116667,67	912,99	717,28
23. 12.09	09.35.50	9,04	5,98	30,9	2,70	57000,0	114583,33	1175,88	889,44
		9,04	8,52	30,9	2,97	57000,0	114583,33	1175,88	624,35
28. 12.09	09.20.36	7,63	6,01	29,5	1,14	54750,0	103333,33	1225,57	822,00
		7,63	7,21	29,5	1,29	54750,0	103333,33	1225,57	684,93

✓ **Linha da lavagem da pasta**

Tabela A 3- Valores obtidos para a análise da prensa1 LCO tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.

		Consistência (%)				CQO (mg/L)		CQO (KgO2/tpsa)	
Dia	Hora	Entrada	Saída	Pr (tpas/h)	FD (m3/tpsa)	Licor de lavagem	Filtrado	Alimentação	Descarga
16. 11.09	09.27.13	3,18	29,54	78,86	-0,81	30625,0	57000,0	1505,3	101,50
17. 11.09	09.14.15	2,57	29,85	65,61	-0,56	36875,0	59375,0	1729,1	100,57
18. 11.09	09.30.19	2,18	28,70	50,83	0,70	30625,0	24250,0	2305,2	87,43
19. 11.09	00.18	2,15	30,30	60,42	0,21	32750,0	63750,0	2744,8	41,46
02. 12.09	09.16.52	2,67	30,61	58,69	1,99	29875,0	60750,0	1832,7	82,06
03. 12.10	09.30.00	2,32	29,39	57,83	1,86	38125,0	70875,0	2512,1	112,57
22. 12.10	9.15.21	2,82	32,68	70,73	0,98	48000,0	52500,0	1381,5	63,45
29. 12.10	9.38.13	2,53	32,00	57,49	1,99	20250,0	47500,0	1492,5	58,33

Tabela A 4- Valores obtidos para a análise da prensa2 LCO tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.

		Consistência (%)				CQO (mg/L)		CQO (KgO ₂ /tpsa)	
Dia	Hora	Entrada	Saída	Pr (tpas/h)	FD (m ³ /tpsa)	Licor de lavagem	Filtrado	Alimentação	Descarga
05. 11.09	10.58.21	6,27	30,71	69,05	0,75	16625,0	30750,0	435,16	45,69
16. 11.09	09.27.13	6,00	29,83	68,04	0,98	16312,5	30625,0	431,87	55,11
17. 11.09	09.14.15	6,02	30,85	69,35	1,41	15562,5	36875,0	400,14	46,06
18. 11.09	09.30.19	5,31	33,17	54,42	1,51	16187,5	25625,0	414,93	37,8
19. 11.09	00.18	6,37	29,70	75,64	0,51	17375,0	32750,0	820,96	53,1
02. 12.09	09.16.52	6,50	29,54	66,20	1,78	18937,5	29875,0	381,38	46,0
03. 12.10	09.30.00	5,11	29,75	61,05	2,44	15375,0	38125,0	618,01	55,9
22. 12.10	9.15.21	6,87	26,48	75,93	-0,26	15125,0	48000,0	293,65	45,0
29. 12.10	9.38.13	6,87	28,72	69,23	0,20	12875,0	20250,0	256,92	40,9

Tabela A 5- Valores obtidos para a análise da prensa3A LCO tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.

		Consistência (%)				CQO (mg/L)		CQO (KgO ₂ /tpsa)	
Dia	Hora	Entrada	Saída	Pr (tpas/h)	FD (m ³ /tpsa)	Licor de lavagem	Filtrado	Alimentação	Descarga
09. 12.09	09.20.10	5,02	36,70	33,57	1,43	9000,0	17600,0	360,23	22,28
10. 12.09	09.48.08	5,52	34,32	34,60	1,19	7250,0	16000,0	269,16	18,04
21. 12.09	09.05.21	4,15	39,24	21,10	3,83	6650,0	14600,0	355,24	16,59
30. 12.09	12.09.23	4,51	37,64	28,13	2,07	4825,0	11600,0	259,28	14,84

Tabela A 6- Valores obtidos para a análise da prensa3B LCO tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.

		Consistência (%)				CQO (mg/L)		CQO (KgO ₂ /tpsa)	
Dia	Hora	Entrada	Saída	Pr (tpas/h)	FD (m ³ /tpsa)	Licor de lavagem	Filtrado	Alimentação	Descarga
09. 12.09	09.20.10	4,95	41,49	35,86	2,13	9000,0	19500,0	375,44	19,16
10. 12.09	09.48.08	5,12	42,36	38,31	1,92	7250,0	16600,0	291,77	16,86
14. 12.09	09.16.39	5,02	34,17	44,37	2,77	6675,0	15850,0	290,46	21,83
15. 12.09	9.03.15	5,46	38,03	31,28	2,66	5650,0	12900,0	218,41	16,03
16. 12.09	14.34.09	4,88	39,81	31,41	2,46	9025,0	14200,0	226,61	27,98
17. 12.09	09.12.09	5,64	38,62	32,74	2,81	5675,0	12100,0	243,57	16,62
21. 12.09	09.05.21	4,75	42,52	32,63	2,73	6650,0	15950,0	305,88	15,00
30. 12.09	12.09.23	4,54	39,88	34,32	2,17	4825,0	12000,0	248,09	13,43

✓ **Linha do branqueamento**

Tabela A 7- Valores obtidos para a análise da prensa1 BRANQ tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.

		Consistência (%)				CQO (mg/L)		CQO (KgO2/tpsa)	
Dia	Hora	Entrada	Saída	Pr (tpas/h)	FD (m3/tpsa)	Licor de lavagem	Filtrado	Alimentação	Descarga
04-01-10	10.09.00	6,76	33,38	75,14	2,24	2395,0	5850,0	85,0	9,56
07-01-10	09.46.09	6,45	35,78	65,05	1,64	2950,0	7225,0	99,4	8,83
08-01-10	09.41.50	5,31	31,24	50,28	3,07	2100,0	5800,0	101,9	9,14

Tabela A 8- Valores obtidos para a análise da prensa2 BRANQ tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.

		Consistência (%)				CQO (mg/L)		CQO (KgO2/tpsa)	
Dia	Hora	Entrada	Saída	Pr (tpas/h)	FD (m3/tpsa)	Licor de lavagem	Filtrado	Alimentação	Descarga
04-01-10	10.09.00	6,72	32,79	77,94	1,76	2395,0	5875,0	39,91	5,67
07-01-10	09.46.09	6,45	34,57	70,08	1,81	900,0	2450,0	36,51	4,18
11-03-10	09.48.32	5,85	31,15	63,35	2,86	590,0	2200,0	34,09	6,05

Tabela A 9- Valores obtidos para a análise da prensa3A BRANQ tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.

		Consistência (%)				CQO (mg/L)		CQO (KgO2/tpsa)	
Dia	Hora	Entrada	Saída	Pr (tpas/h)	FD (m3/tpsa)	Licor de lavagem	Filtrado	Alimentação	Descarga
11-01-10	09.43.44	6,26	36,81	35,43	1,75	650,0	3250,0	50,19	4,63
10-03-10	09.41.50	5,30	30,67	27,00	2,82	1037,5	1900,0	39,19	4,09

Tabela A 10- Valores obtidos para a análise da prensa3B BRANQ tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.

		Consistência (%)				CQO (mg/L)		CQO (KgO2/tpsa)	
Dia	Hora	Entrada	Saída	Pr (tpas/h)	FD (m3/tpsa)	Licor de lavagem	Filtrado	Alimentação	Descarga
11-01-10	09.43.44	6,26	38,10	36,88	1,85	650,0	3175,0	50,19	4,72
10-03-10	09.41.50	5,30	27,97	27,01	2,33	1037,5	2300,0	39,19	5,55

Tabela A 11- Valores obtidos para a análise da prensa4A BRANQ tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.

		Consistência (%)				CQO (mg/L)		CQO (KgO2/tpsa)	
Dia	Hora	Entrada	Saída	Pr (tpas/h)	FD (m3/tpsa)	Licor de lavagem	Filtrado	Alimentação	Descarga
12-01-10	09.34.50	3,03	29,91	33,00	1,07	0,0	990,0	30,27	2,56
13-01-10	11.03.11	3,47	26,17	35,00	0,75	0,0	870,0	28,52	2,93
11-03-10	09.48.32	2,71	25,25	37,96	1,54	0,0	635,0	25,26	2,23

Tabela A 12- Valores obtidos para a análise da prensa4B BRANQ tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.

		Consistência (%)				CQO (mg/L)		CQO (KgO2/tpsa)	
Dia	Hora	Entrada	Saída	Pr (tpas/h)	FD (m3/tpsa)	Licor de lavagem	Filtrado	Alimentação	Descarga
12-01-10	09.34.50	3,62	28,67	33,00	1,00	0,0	982,5	26,25	3,04
13-01-10	11.03.11	4,20	34,71	35,00	1,67	0,0	1077,5	27,50	2,49

Tabela A 13- Valores obtidos para a análise da prensa5 BRANQ tendo em conta a colheita de amostras neste equipamento.

		Consistência (%)				CQO (mg/L)		CQO (KgO2/tpsa)	
Dia	Hora	Entrada	Saída	Pr (tpas/h)	FD (m3/tpsa)	Licor de lavagem	Filtrado	Alimentação	Descarga
11-01-10	09.43.44	5,83	36,44	68,24	1,63	0,0	650,0	19,29	2,19
10-03-10	09.41.50	6,34	37,56	47,66	1,96	0,0	1037,5	15,05	2,14

✓ **Parâmetros de caracterização das prensas das linhas da lavagem e do branqueamento.**

Tabela A 14- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização deste equipamento de lavagem (difusor 1).

Dia	Hora	R_{CQO} (%)	RD (%)	E	E_{mod}	ER (%)	Y
04. 11.09	09.12	57,3	184,10	-	-	59,39	1,23
05. 11.09	10.58.21	2,1	37,00	-	1,07	12,90	1,40
10. 11.09	09.22.57	32,9	77,34	-	5,89	36,49	0,99
		47,0	103,40	-	-	48,78	0,99
18. 11.09	16.31.39	43,2	80,66	-	69,09	48,21	0,99
		46,6	85,52	-	17,44	51,11	0,99
23. 11.09	09.10.34	23,6	66,11	-	-	26,71	1,33
		41,2	104,38	-	-	42,17	1,33
24. 11.09	14.15.00	35,5	78,09	-	-	39,97	1,17
		42,2	89,32	-	-	45,72	1,17
30. 11.09	09.43.40	42,1	93,04	-	9,91	44,78	1,09
		36,9	83,78	-	12,14	40,32	1,09
07. 12.09	10.24.34	11,5	35,58	-	1,07	15,82	1,07
		24,7	60,98	-	25,73	27,12	1,07
23. 12.09	09.35.50	46,7	89,07	-	14,12	50,13	1,14
		47,1	89,77	-	13,70	50,52	1,14
28. 12.09	09.20.36	43,6	91,49	-	15,41	47,50	1,12
		38,2	82,81	-	47,82	42,99	1,12

Tabela A 15- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização deste equipamento de lavagem (difusor 2).

Dia	Hora	R_{ccqo} (%)	RD (%)	E	E_{mod}	ER (%)	Y
04. 11.09	09.12	57,3	184,10	-	-	59,39	1,23
05. 11.09	10.58.21	11,5	49,82	-	0,72	26,75	1,24
10. 11.09	09.22.57	19,8	56,91	-	0,34	25,98	1,07
		42,2	98,51	-	11,59	44,97	1,07
18. 11.09	16.31.39	60,3	102,83	-	-	61,08	1,02
		60,4	102,97	-	-	61,17	1,02
23. 11.09	09.10.34	30,4	87,79	-	--	35,74	1,29
		40,2	108,35	-	-	44,11	1,29
24. 11.09	14.15.00	24,8	59,47	-	--	30,39	1,10
		38,6	82,55	-	--	42,20	1,10
30. 11.09	09.43.40	27,2	65,47	-	-	31,47	1,05
		40,0	88,55	-	16,47	42,56	1,05
07. 12.09	10.24.34	-12,2	-7,73	0,03	-	-3,48	1,22
		21,4	55,52	-	-	25,00	1,22
23. 12.09	09.35.50	24,4	55,37	-	0,46	31,08	1,17
		46,9	89,58	-	18,81	50,28	1,17
28. 12.09	09.20.36	32,9	25,84	-	0,92	7,08	1,53
		44,1	45,65	-	0,11	5,88	1,84

Tabela A 16- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização deste equipamento de lavagem (prensa1 LCO).

Dia	Hora	RCQO (%)	RD (%)	E	Emod	ER (%)	Y	E10
16. 11.09	09.27.13	93,3	31,5	-	-	13,95	1,01	-
17. 11.09	09.14.15	94,2	22,3	-	-	6,04	1,15	-
18. 11.09	09.30.19	96,2	68,1	7,27	-	31,61	0,43	51,40
19. 11.09	00.18	98,5	137,0	42,25	-	70,17	0,95	-
02. 12.09	09.16.52	95,5	60,2	2,46	-	28,01	1,15	-
03. 12.10	09.30.00	95,5	60,7	2,81	4,71	29,22	1,01	5,91
22.12.09	09.15.21	95,4	-	-	-	23,30	1,21	19,70
29.12.09	09.38.13	96,1	55,2	2,24	-	29,25	1,17	-

Tabela A 17- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização deste equipamento de lavagem (prensa2 LCO).

Dia	Hora	RCQO (%)	RD (%)	E	Emod	ER (%)	Y	E10
05. 11.09	10.58.21	89,50	62,6	3,77	16,22	30,45	1,00	6,66
16. 11.09	09.27.13	87,24	32,2	1,60	-	15,08	1,07	-
17. 11.09	09.14.15	88,49	43,8	1,60	-	19,90	1,42	-
18. 11.09	09.30.19	90,90	52,1	1,87	-	19,49	1,08	-
19. 11.09	00.18	93,53	83,1	7,08	1,40	59,82	0,55	52,16
02. 12.09	09.16.52	87,94	76,3	2,27	-	27,25	1,15	-
03. 12.10	09.30.00	90,96	49,4	1,33	-	28,87	1,18	-
22. 12.09	09.15.21	84,68	68,0	-	-	25,28	1,95	-
29. 12.09	09.38.13	84,08	33,7	6,77	-6,88	13,08	0,98	-

Tabela A 18- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização deste equipamento de lavagem (prensa3A LCO).

Dia	Hora	R_{cqo} (%)	RD (%)	E	E_{mod}	ER (%)	Y	E₁₀
09. 12.09	09.20.10	93,8	56,0	2,05	1,66	32,16	0,90	12,19
10. 12.09	09.48.08	93,3	68,4	2,86	3,93	40,00	0,99	10,22
21. 12.09	09.05.21	95,3	49,6	1,02	1,67	30,32	1,01	5,05
30. 12.09	12.09.23	94,3	41,5	1,21	1,59	26,80	0,95	7,05

Tabela A 19- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização deste equipamento de lavagem (prensa3B LCO).

Dia	Hora	RCQO (%)	RD (%)	E	E_{mod}	ER (%)	Y	E₁₀
09. 12.09	09.20.10	94,9	52,1	1,38	2,26	30,48	1,01	6,86
10. 12.09	09.48.08	94,2	36,5	1,01	4,25	21,35	1,06	3,00
14. 12.09	09.16.39	92,5	43,1	1,03	3,94	26,25	1,08	2,41
15. 12.09	09.03.15	92,7	36,9	0,84	2,84	22,00	1,08	2,84
16. 12.09	14.34.09	87,7	-	-	-	-	1,25	-
17. 12.09	09.12.09	93,2	43,4	0,94	1,09	28,17	0,89	6,63
21. 12.09	09.05.21	95,1	44,8	1,03	3,65	27,23	1,08	3,29
30. 12.09	12.09.23	94,6	38,8	1,07	2,41	24,56	1,02	4,74

Tabela A 20- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização da prensa1 BRANQ.

Dia	Hora	R_{cqo} (%)	RD (%)	E	E_{mod}	Y	E₁₀
04-01-10	10.09.00	88,8	34,2	0,82	1,68	0,90	3,49
07-01-10	09.46.09	91,1	46,0	1,37	14,52	0,97	1,17
08-01-10	09.41.50	91,0	40,9	0,92	3,99	0,98	1,82

Tabela A 21- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização da prensa2 BRANQ.

Dia	Hora	R_{cqo} (%)	RD (%)	E	E_{mod}	Y	E₁₀
04-01-10	10.09.00	85,79	15,1	0,43	-	1,88	1,10
07-01-10	09.46.09	88,56	18,2	0,51	0,97	0,91	0,17
11-03-10	09.48.32	82,25	-	-0,87	-	1,04	-

Tabela A 22- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização da prensa3A BRANQ.

Dia	Hora	R_{cqo} (%)	RD (%)	E	E_{mod}	Y	E₁₀
11-01-10	09.43.44	90,8	23,6	0,67	1,89	0,94	2,89
10-03-10	09.41.50	89,6	30,6	0,73	0,80	0,79	4,93

Tabela A 23- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização da prensa3B BRANQ.

Dia	Hora	R_{CQO} (%)	RD (%)	E	E_{mod}	Y	E₁₀
11-01-10	09.43.44	90,6	16,1	0,44	0,83	0,93	3,27
10-03-10	09.41.50	85,8	3,0	0,08	3,84	0,96	-

Tabela A 24- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização da prensa4A BRANQ.

Dia	Hora	R_{CQO} (%)	RD (%)	E	E_{mod}	Y	E₁₀
12-01-10	09.34.50	91,6	37,9	-	1,24	1,08	-
13-01-10	11.03.11	89,7	42,9	-	-0,33	0,85	-
11-03-10	09.48.32	91,2	45,3	-	0,01	0,92	-

Tabela A 25- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização da prensa4B BRANQ.

Dia	Hora	R_{CQO} (%)	RD (%)	E	E_{mod}	Y	E₁₀
12-01-10	09.34.50	88,4	32,3	-	-	1,00	-
13-01-10	11.03.11	90,9	46,3	-	-	0,91	-

Tabela A 26- Valores obtidos para os vários parâmetros que permitem a caracterização da prensa5 BRANQ.

Dia	Hora	R_{CQO} (%)	RD (%)	E	E_{mod}	Y	E₁₀
11-01-10	09.43.44	88,6	-	-	-	0,54	8,19
10-03-10	09.41.50	85,8	-	-	-	1,05	-